



----- UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID -----

Ingeniería Industrial: Especialidad Electrónica

Diseño, simulación y construcción de un convertidor
elevador corrector del factor de potencia

Proyecto fin de carrera

Tutor: Cristina Fernández

Alumno: Alina Georgiana Iordanescu



----- UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID -----



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ¿PARA QUÉ SE EMPLEA EL CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA?	1
1.2. ¿QUÉ ES EL FACTOR DE POTENCIA?	1
1.3. NORMATIVA	4
1.4. FORMAS DE CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA	8
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. ESPECIFICACIONES	12
3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA	13
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES	13
3.1.1. <i>Etapas de potencia</i>	14
3.1.2. <i>Etapas de control</i>	19
4. DISEÑO DEL CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR ..	22
4.1. DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA MEDIANTE PSIM.....	22
4.2. DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL MEDIANTE SMARTCTRL	24
4.2.1. <i>Esquemático desde el SmartCTRL al PSIM:</i>	32
5. VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE PFC	33
5.1. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR ELEVADOR (PSIM).....	33
5.2. SIMULACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO	37
5.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA ALGUNOS PARÁMETROS	41
6. DISEÑO DEL PROTOTIPO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL CONVERTIDOR ELEVADOR	47
6.1. DISEÑO DE LA PLACA PCB (ORCAD-LAYOUT).....	48
6.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	50
6.3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO	51
7. CONCLUSIONES.....	65
8. DESARROLLOS FUTUROS.....	66
9. ANEXO	67
9.1. HOJA DE DATOS	67
9.2. ESPECIFICACIONES	68
9.3. DESCRIPCIÓN DE PINES	68
9.4. NOTAS DE APLICACIÓN	69
10. BIBLIOGRAFÍA	70



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	FACTOR DE DESPLAZAMIENTO	3
FIGURA 2	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS SEGÚN LA NORMA EN-61000-3-2	6
FIGURA 3	EFFECTOS DEL PFC EN LA CORRIENTE DE LÍNEA DEL CIRCUITO	8
FIGURA 4	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS CONVERTIDORES CA/CC DE UNA ETAPA	10
FIGURA 5	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS CONVERTIDORES CA/CC DE DOS ETAPAS	10
FIGURA 6	CIRCUITO DEL PFC	13
FIGURA 7	ETAPA DE POTENCIA	14
FIGURA 8	INTERRUPTOR CERRADO (MCC)	15
FIGURA 9	INTERRUPTOR ABIERTO (MCC)	15
FIGURA 10	CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST) OPERANDO EN MODO CONTINUO.	16
FIGURA 11	INTERRUPTOR CERRADO (MCD)	17
FIGURA 12	INTERRUPTOR ABIERTO (MCD)	17
FIGURA 13	CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST) OPERANDO EN MODO DISCONTINUO.	18
FIGURA 14	LAZO EXTERNO DE TENSIÓN	19
FIGURA 15	LAZO INTERNO	20
FIGURA 16	ESQUEMÁTICO DEL REGULADOR DEL LAZO INTERNO DE CORRIENTE.	20
FIGURA 17	PFC BOOST CONVERTER	24
FIGURA 18	CONFIGURACIÓN DEL CONVERTIDOR ELEVADOR	25
FIGURA 19	SENSOR DE CORRIENTE	25
FIGURA 20	INNER LOOP REGULADOR	26
FIGURA 21	UC3854A MULTIPLIER	26
FIGURA 22	SINGLE POLE	27
FIGURA 23	INNER LOOP	28
FIGURA 24	OUTER LOOP	28
FIGURA 25	SOLUCIÓN DEL SISTEMA LAZO INTERNO	29
FIGURA 26	VRECT (V) Y VEA (V)	30
FIGURA 27	PARÁMETROS DEL PFC DEL CONVERTIDOR ELEVADOR	31
FIGURA 28	ESQUEMÁTICO CON SMARTCTRL	32
FIGURA 29	TENSIÓN EFICAZ DE ENTRADA $V_{E(EFF)}=229V$	33
FIGURA 30	SIMULACIÓN CON TENSIÓN EFICAZ DE ENTRADA $V_{E(EFF)}$	34
FIGURA 31	TENSIÓN DE ENTRADA $V_{E(PICO)}=325V$	35
FIGURA 32	SIMULACIÓN TENSIÓN DE ENTRADA $V_{E(PICO)}$	36
FIGURA 33	VERSIÓN DE UN CONDENSADOR 450UF	37
FIGURA 34	RELOJ DE SIMULACIÓN	38
FIGURA 35	CORRIENTE DE ENTRADA	38
FIGURA 36	CORRIENTE DE SALIDA	39
FIGURA 37	SENSOR DE SALIDA	39
FIGURA 38	CORRIENTE LM	39
FIGURA 39	TENSIÓN DE SALIDA	40
FIGURA 40	TENSIÓN DEL CONTROLADOR UC3854A	40
FIGURA 41	ELEVADOR CON BOBINA DE 2MH	41
FIGURA 42	CORRIENTE ENTRADA	42
FIGURA 43	CORRIENTE EN LA BOBINA	42
FIGURA 44	CORRIENTE SALIDA	42
FIGURA 45	CORRIENTE DEL SENSOR	43
FIGURA 46	TENSIÓN VVEA	43
FIGURA 47	CORRIENTE DIODO Y CONDENSADOR	43
FIGURA 48	CORRIENTE DEL MOSFET	44
FIGURA 49	TENSIÓN DE ENTRADA	44
FIGURA 50	ESQUEMÁTICO DEFINITIVO	45
FIGURA 51	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	45
FIGURA 52	ESQUEMÁTICO ORCAD-CAPTURE	47
FIGURA 53	PROTOTIPO PFC BOOST	50



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

FIGURA 54	PROTOTIPO DE LA PLACA	51
FIGURA 55	ELEVADOR PFC	52
FIGURA 56	PLACA DEFINITIVA	52
FIGURA 57	MONTAJE PLACA	53
FIGURA 58	CONVERTIDOR ELEVADOR CON CIRCUITO DE CONTROL	53
FIGURA 59	$V_{IN} = 57.8V$	54
FIGURA 60	$V_{OUT} = 100V$	54
FIGURA 61	$V_{IN} = 57.8V$	55
FIGURA 62	$V_{OUT} = 200V$	55
FIGURA 63	$V_{IN} = 144.4V$	56
FIGURA 64	$V_{OUT} = 250$	56
FIGURA 65	$V_{IN} = 30.4$ $I_{IN} = 0.46A$	57
FIGURA 66	$V_{OUT} = 50V$	57
FIGURA 67	$V_{IN} = 59.0V$ $I_{IN} = 0.91A$	58
FIGURA 68	$V_{OUT} = 100V$	58
FIGURA 69	$V_{IN} = 57.2V$ $I_{IN} = 0.23A$	59
FIGURA 70	$V_{OUT} = 100V$	59
FIGURA 71	$V_{IN} = 113.5 V$ $I_{IN} = 0.46 A$	60
FIGURA 72	$V_{OUT} = 200V$	60
FIGURA 73	$V_{IN} = 169.7V$	61
FIGURA 74	$V_{OUT} = 300V$	61
FIGURA 75	$V_{IN} = 200V$	62
FIGURA 76	$V_{OUT} = 356V$	62
FIGURA 77	VARIACIÓN DE LA TENSIÓN CON RESPECTO A LA RESISTENCIA DE CARGA	64
FIGURA 78	RENDIMIENTO CON RESPECTO A LA TENSIÓN DE SALIDA	64
FIGURA 81	UC3854A	67



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	LIMITES DEL CONTENIDO ARMÓNICO SEGÚN LA NORMA IEC 1000-3-2.....	5
TABLA 2	GUÍA DE LA NORMA EN 61000-3-2	7
TABLA 3	VALORES DE LA VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	63



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

1. Introducción

El número de cargas no lineales conectadas a la red de suministro de energía eléctrica ha aumentado notablemente en los últimos años.

Se pueden encontrar reguladores electrónicos de velocidad de motores, equipos de iluminación y fuentes de alimentación de aparatos electrónicos de muy variado propósito, tales como equipos de audio, cocinas de inducción, sistemas de telecomunicaciones, etc. Entre ellos destacan sin embargo los equipos de las tecnologías de la información, ordenadores personales y sus monitores y los receptores de televisión.

La masiva utilización de fuentes de alimentación de equipos electrónicos ha supuesto que la red eléctrica se haya polucionado enormemente, principalmente a causa de los armónicos de corriente inyectados en la red por estas fuentes de alimentación.

Aparecen importantes problemas asociados a los armónicos de corriente, fundamentalmente la distorsión de la forma de onda de la tensión, calentamientos adicionales, ruidos y la limitación de la capacidad de la red para proporcionar energía eléctrica a los usuarios.

En este capítulo se recogen en primer lugar unas definiciones acerca del factor de potencia y del contenido armónico de la corriente. Más adelante se describirá la generación de armónicos de corriente asociada a la etapa clásica de conversión alterna / continua, y los problemas que originan los armónicos de corriente.

1.1. ¿Para qué se emplea el corrector del factor de potencia?

- Disminución de las pérdidas en conductores.
- Reducción de las caídas de tensión.
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.
- Incremento de la vida útil de las instalaciones.

1.2. ¿Qué es el factor de potencia?

En los convertidores CA / CC es necesario determinar cómo es la calidad de la forma de onda de la corriente de entrada. Tradicionalmente, se han utilizado dos parámetros para cuantificar este aspecto, el factor de potencia (FP) y la distorsión armónica total (DAT). Aunque con la entrada en vigor de la norma IEC 61000-3-2, la calidad de la forma de onda de la corriente absorbida por una fuente de alimentación, se mide exclusivamente por el cumplimiento o incumplimiento de los límites impuestos sobre cada uno de los armónicos, la información que proporcionan el factor de potencia y la distorsión armónica total resulta también valiosa, fundamentalmente por estar contenida en un solo valor.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

El Factor de Potencia se define como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$FP = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{\text{Potencia Activa}}{V_{gef} \cdot I_{gef}}$$

Siendo $V_{g(eff)}$ el valor eficaz de la tensión de entrada e $I_{g(eff)}$ el valor eficaz de la corriente de entrada. También podemos escribirlo como:

$$FP = \frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v_g(t) \cdot i_g(t) \cdot dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v_g(t)^2 \cdot dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_g(t)^2 \cdot dt}}$$

Donde T es el periodo de la tensión de red, $V_{g(t)}$ la tensión de entrada e $I_{g(t)}$ la corriente de entrada.

Si consideramos que tanto $V_{g(t)}$ como $I_{g(t)}$ conservan su carácter sinusoidal, esto nos conduce a la tradicional concepción electrotécnica del factor de potencia:

$$FP = \cos\phi$$

Donde ϕ es el desplazamiento de fase entre la corriente y la tensión de entrada.

Otro concepto habitualmente utilizado es el de Distorsión Armónica Total (en su denominación inglesa, Total Harmonic Distorsion o THD). Ésta se define como el cociente entre el valor eficaz de la onda formada por el conjunto de armónicos y el valor eficaz de la componente fundamental. Designado como i_{eff1} el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente i , y como i_{eff2} , i_{eff3} , ..., i_{effn} los valores de los distintos armónicos, la Distorsión Armónica Total (DAT) puede expresarse como:

$$DAT = \frac{\sqrt{i_{ef2}^2 + i_{ef3}^2 + \dots + i_{efn}^2}}{i_{ef1}} = \sqrt{\frac{i_{ef}^2}{i_{ef1}^2} - 1}$$

Donde I_{eff} es el valor eficaz de la corriente total.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

En la Figura 1 se muestra el factor de desplazamiento en el caso de tensión sinusoidal y corriente con armónicos.

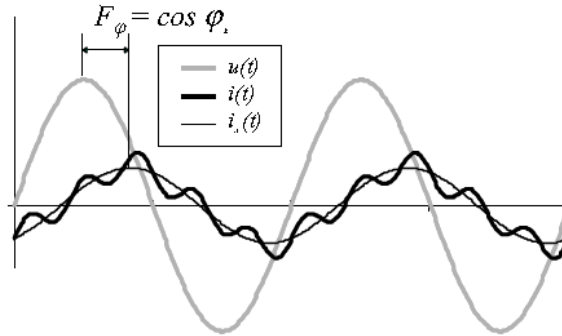


Figura 1 Factor de desplazamiento

El factor de desplazamiento, F_ϕ es el desfase del armónico fundamental de la corriente respecto a la tensión. Este parámetro coincide con el tradicional $\cos\phi$ correspondiente al régimen permanente sinusoidal.

El factor de distorsión, F_D es la relación entre el valor eficaz del armónico respecto al valor eficaz total de la onda.

En el caso que se está analizando (tensión sinusoidal y corriente con armónicos), el factor de distorsión puede expresarse en función de la distorsión armónica. Es posible relacionar el factor de potencia y la distorsión armónica total de la siguiente manera:

$$F_\phi = \frac{I_1}{I_a} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \dots + I_n^2 + \dots}} = \frac{1}{\sqrt{1 + DAT^2}}$$

$$F_D = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + DAT^2}} \times \cos\phi_1$$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

1.3. Normativa

Para tratar de solucionar la distorsión de los armónicos de corriente, distintas organizaciones internacionales han elaborado una normativa destinada a reducir el nivel de armónicos introducidos en la red, como consecuencia de la implantación de estas normas, las técnicas de Corrección del Factor de Potencia (PFC) han experimentado un notable desarrollo.

La primera norma sobre armónicos de baja frecuencia nació en Europa. En 1969, el European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) y el International Electrotechnical Commission (IEC) formaron comités para investigar los efectos de los armónicos causados por circuitos conmutados de estado sólido usados en aplicaciones domésticas.

La norma IEC 1000-3-2 es en la actualidad la norma con más potencial de aplicación en todo el mundo. CENELEC la ha convertido en una norma de obligado cumplimiento en Europa (norma EN61000-3-2) a partir de principios de 2001, siendo también recomendada aunque no obligatoria en Japón, donde los valores máximos admisibles para cada uno de los armónicos debe modificarse multiplicándose por el cociente entre los valores de la tensión de red en Europa y en Japón (típicamente 2.3). Su aceptación en EE.UU. va en aumento ya que no hay una norma equivalente del IEEE y porque muchos fabricantes estadounidenses deben competir en mercados extranjeros, especialmente en la Unión Europea.

La norma IEC 1000-3-2 es aplicable a equipos eléctricos y electrónicos que tengan una corriente de entrada por fase menor o igual a 16 A y que se conecten a la red pública de baja tensión. En la actualidad, se especifica una potencia mínima de 75 vatios a partir de la cual debe cumplirse la norma aunque en el futuro se prevé un descenso del límite a 50 W. La norma propone una clasificación de los equipos bajo prueba en cuatro grupos. Cada uno de estos grupos se denomina Clase y se definen como sigue:

Clase A: Equipos trifásicos equilibrados, accionadores de motores y todos aquellos equipos que no pertenezcan a cualquier otra clase y cuya forma de onda de corriente de entrada tenga más de un 5% fuera de la máscara de forma de onda especial

Clase B: Equipos portátiles (no trifásicos), aquellas herramientas eléctricas utilizadas durante cortos intervalos de tiempo (solamente unos minutos); ejemplo: taladros, batidoras.

Clase C: Equipos de iluminación (no trifásicos), lámparas y sus equipos auxiliares, y balastos.

Clase D: Equipos con una potencia menor de 600 vatios que no pertenezcan al resto de clases y con una forma de onda de corriente de entrada que quede incluida en más de un 95% dentro de la máscara de forma de onda especial. Formas de onda que tengan



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

pequeños picos fuera de la máscara serán clasificadas por tanto como clase D. La línea central, M, coincide con el valor de pico de la forma de onda.

Clase	A	B	C	D
Orden del armónico, n	Amperios	Amperios	% de la corriente de entrada fundamental	mA/W
Impares				
3	2,3	3,45	30xFactor de Potencia	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,4	0,6	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
15<n<39	2,25/n	3,375/n	3	3,85/n
Pares				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,3	0,45	-	-
8<n<40	1,84/n	2,76/n	-	-

Tabla 1 Límites del contenido armónico según la norma IEC 1000-3-2.

Como se puede apreciar, la norma sólo impone un límite máximo para cada armónico según la Clase a la que pertenezca el equipo. Sólo se hace referencia al factor de potencia en el valor del tercer armónico de la clase C y en ningún momento se habla de la distorsión armónica.

A continuación se mostrará el diagrama de flujo para la clasificación de los equipos según la norma:



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

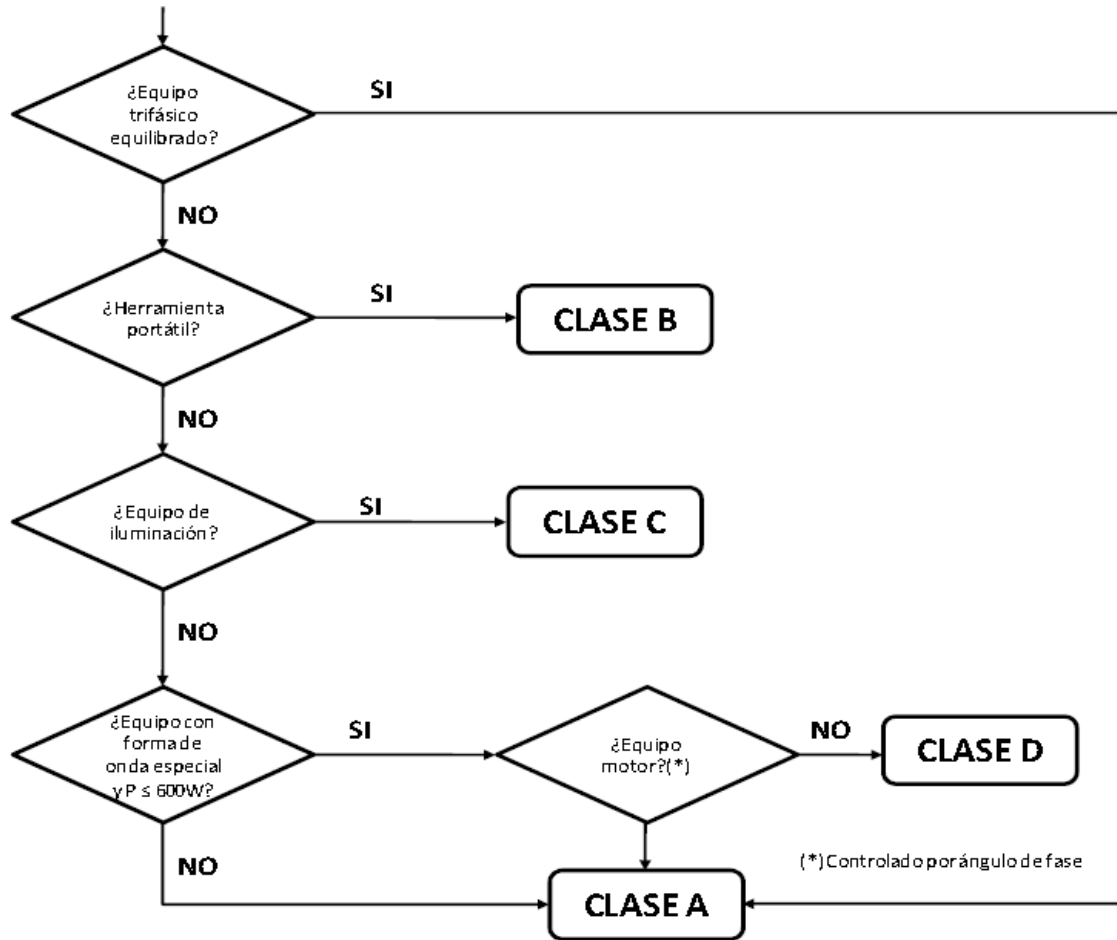


Figura 2 Diagrama de flujo para la clasificación de los equipos según la norma EN-61000-3-2

Las áreas sombreadas representan el porcentaje de la forma de onda de corriente que queda fuera de la máscara. Si estas áreas constituyen más de un 5% de la onda de corriente completa, entonces el equipo se clasifica como Clase A, si por el contrario se trata de un porcentaje menor, los límites aplicables son los de Clase D.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Para poder entender mejor la norma, a continuación se mostrará una guía aclaratoria:

ORDEN DEL ARMÓNICO N	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
-	A eficaces	A eficaces	% del valor eficaz del armónico fundamental de la corriente de entrada	mA/W de la potencia de entrada (50-600W)
2	1.08	1.620	2	-
3	2.30	3.450	$30 \times \lambda$	3.4
4	0.43	0.645	-	-
5	1.14	1.710	10	1.9
6	0.30	0.450	-	-
7	0.77	1.155	7	1.0
9	0.40	0.600	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	$3.85/n$
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times (15/n)$	$0.225 \times (15/n)$	3	$3.85/n$
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times (8/n)$	$0.345 \times (8/n)$	Solo armónicos impares	Solo armónicos impares

λ es el Factor de Potencia del circuito
"Solo armónicos impares", implica que no se admitirán los armónicos pares.

- ① Ventanas temporales de medida, \forall tipo de armónicos:
- ventana rectangular - 16 ciclos
 - ventana Hanning - 20 a 25 ciclos
- ② En algunos casos necesario filtro paso-bajo de 1^{er} orden con etc. de tiempo $1.5s \pm 10\%$.
- ③ Ver requisitos de la tensión de ensayo en la norma.

Cálculo de la Potencia Activa y el Factor de Potencia

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(\omega t) \cdot i(\omega t) \cdot d\omega t}{U_{ef} \cdot I_{ef}} \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T u(\tau) \cdot i(\tau) \cdot d\tau$$

Todos los límites expresados en valores eficaces. Se tendrán en cuenta 40 armónicos
NO se consideran aquellos valores de la corriente armónica:

• < 5mA eficaces ó

• < 0.6% I_{ef} de entrada

Las medidas deben realizarse a plena carga (para Clase D) o de forma que se obtengan las máximas componentes armónicas bajo condiciones de funcionamiento normal del equipo.

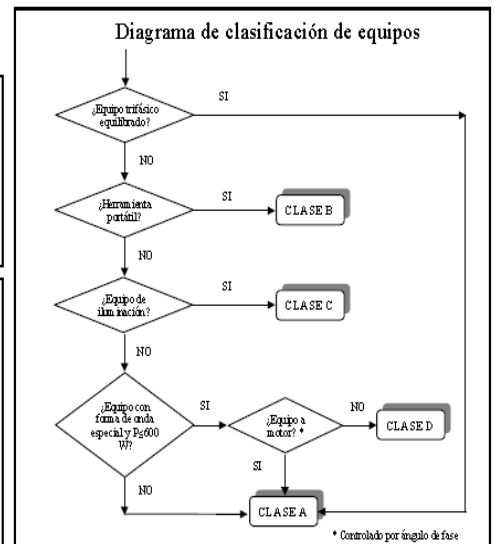
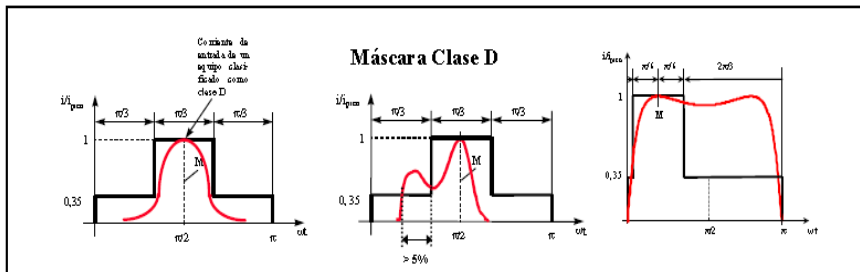


Tabla 2 Guía de la norma EN 61000-3-2

Esta tabla es aplicable a equipos monofásicos y trifásicos con: $I \leq 16A$ eficaz por fase, Tensiones $\geq 220 V$ (fase-neutro), $P > 25W$.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

1.4. Formas de corregir el factor de potencia

Para corregir el factor de potencia es necesario conseguir un menor desfasamiento y reducir los armónicos de la corriente de entrada para obtener una onda sinusoidal en la salida. La Figura 3 nos muestra la corriente I_o y tensión de salida U_o y la corriente una vez corregido el factor de potencia I_{PFC} .

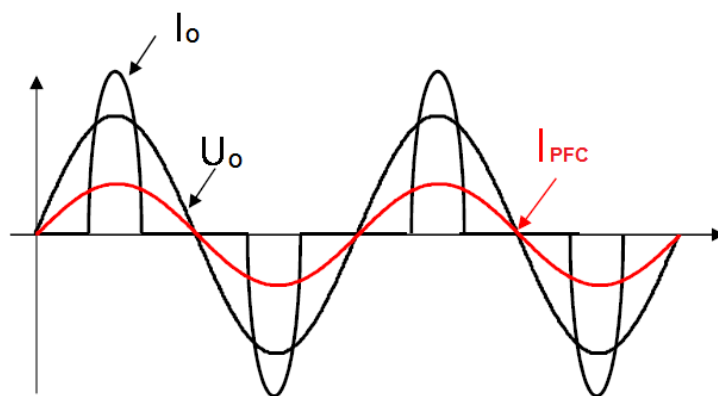


Figura 3 Efectos del PFC en la corriente de línea del circuito

Para conseguir corregir el factor de potencia, hay dos tipos de soluciones:

Las soluciones pasivas se basan en añadir elementos reactivos (bobinas y condensadores) al rectificador con objeto de extender la conducción de los diodos de forma que el contenido armónico de la corriente de entrada quede dentro de los límites impuestos por la norma.

Estas soluciones se caracterizan por ser soluciones simples, robustas y baratas. Sin embargo, esta clase de equipos son complicados de diseñar ante un rango de entrada universal y presentan el inconveniente de ser voluminosos y pesados.

Las soluciones activas se basan en la utilización de los convertidores electrónicos conmutados. Este tipo de soluciones proporcionan mejores resultados en cuanto a la forma de onda de la corriente demandada de la red, llegando a obtenerse sin dificultad corriente de entrada sinusoidal y factor de potencia unidad.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Dentro de este tipo de soluciones se dispone de tres posibles estrategias para limitar el contenido armónico de la corriente que absorbe un determinado equipo:

- Filtros activos.
- Convertidores CA/CC de una etapa.
- Convertidores CA/CC de dos etapas.

El proyecto se centrará en la tercera opción para la corrección del factor de potencia, es decir, aplicando convertidores de CA/CC de dos etapas que en el apartado 3 se detallará.

Filtros activos:

Su uso resulta especialmente interesante en instalaciones ya existentes para transformar en sinusoidal la corriente de la línea sin necesidad de realizar cambios en las instalaciones. Sin embargo, su uso está limitado prácticamente a instalaciones de alta potencia debido a su complejidad y elevado coste, aunque sea posible emplearlos en baja potencia.

Mediante la utilización de filtros activos es posible filtrar todas las componentes armónicas de baja frecuencia, sin embargo, su rendimiento es peor que el de los filtros pasivos, generan rizado de corriente de alta frecuencia e interferencias electromagnéticas.

Convertidores CA/CC de una etapa:

La idea básica es integrar en una única etapa las dos que integran el convertidor de dos etapas. Aunque esta solución no es tan buena como la de dos etapas en cuanto a la forma de la corriente de entrada, la corriente que se absorbe es suficientemente buena como para cumplir la norma EN 61000-3-2.

La potencia de entrada de las fuentes de alimentación CA/CC es pulsante mientras que la tensión de salida y la potencia es constante, por tanto es necesario un componente capaz de almacenar energía cuando la potencia de entrada sea mayor que la salida, y cederla a la carga cuando la entrada proporcione menos potencia de la que demanda la carga. Este dispositivo de almacenamiento es un condensador.

Al contrario que en las soluciones de dos etapas, en este tipo de convertidores la tensión del condensador de almacenamiento no está regulada, lo que se regula es la tensión de salida. Como consecuencia en los convertidores de una etapa la tensión en el condensador de almacenamiento varía con la tensión de línea y dependiendo de la solución, también con la potencia de carga.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

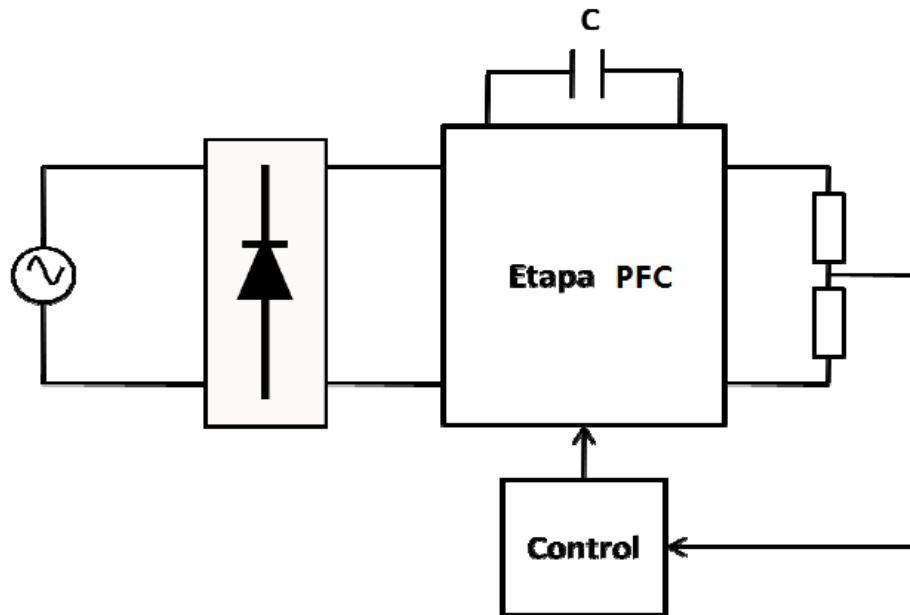
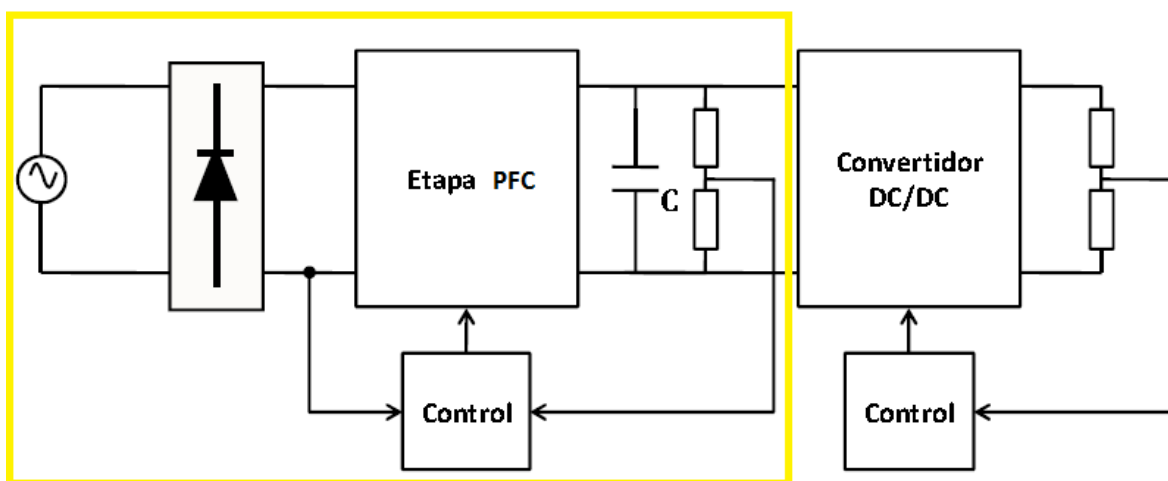


Figura 4 Diagrama de bloques de los convertidores CA/CC de una etapa

Convertidores CA/CC de dos etapas

Este tipo de topologías proporcionan Factor de Potencia unidad, corriente de entrada sinusoidal y una tensión de salida bien regulada.



Proyecto fin de carrera

Figura 5 Diagrama de bloques de los convertidores CA/CC de dos etapas



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

El convertidor CA/CC está compuesto por dos etapas independientes, la etapa correctora del factor de potencia o prerreguladora del factor de potencia y un convertidor CC/CC. Uno de los dos lazos de control de la etapa prerreguladora del Factor de Potencia muestrea la tensión de línea y obliga a la corriente de entrada a adoptar una forma idéntica a la de la tensión de entrada, así como a permanecer en fase con ella, de manera que se obtiene un Factor de Potencia unidad.

El segundo lazo de control de la etapa de corrección del factor de potencia se encarga de regular la tensión en el condensador de almacenamiento, aunque su respuesta dinámica es lenta lo que ocasiona la inclusión de la segunda etapa.

El convertidor CC/CC constituye la segunda etapa que cuenta con un único lazo de control mediante el cual regula la tensión de salida y proporciona la respuesta dinámica rápida necesaria.

A pesar de las buenas características que presenta el convertidor de dos etapas respecto a la entrada, su principal inconveniente es la complejidad puesto que es necesario diseñar dos convertidores completos, ambos capaces de transferir la potencia de entrada con el máximo rendimiento. Para soluciones de baja potencia, existen otras alternativas como los convertidores CA/CC de una etapa.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es la corrección del factor de potencia mediante un convertidor elevador.

Es necesario porque disminuye las pérdidas en los conductores, reduce la caída de tensión, aumenta la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores y también incrementa la vida útil de las instalaciones.

A continuación se muestran y se explican los diferentes objetivos que se han ido marcando en el desarrollo del proyecto, es decir, los principales objetivos que se van a tratar de alcanzar:

- Elección de los componentes que se utilizan tanto en el circuito compuesto por el convertidor elevador como también los componentes del circuito de control.
- Modelado del circuito con el programa PSIM y posteriormente con SmartCTRL.
- Diseño del esquemático con el programa OrCAD-Capture y a continuación el layout del mismo.
- Construcción del prototipo de la placa PCB y por último, pruebas de validación con diferentes lazos de control y comparación con las simulaciones.

Los distintos puntos que se han ido marcando, son considerados los más importantes y los de mayor relevancia de cara a un buen funcionamiento del Corrector del Factor de Potencia; para ello a lo largo del proyecto se van a ir mostrando por qué son importantes estos tipos de circuitos en la electrónica.

2.1. Especificaciones

A continuación se describen las etapas que componen el equipo objeto de PFC:

Etapas de potencia (Convertidor elevador):

- Tensión de entrada 220 V_{AC} (aproximadamente 325 V_p)
- Tensión de salida 400 V
- Potencia de salida 300 W
- Frecuencia de conmutación 100KHz

Además el control se implementará utilizando el circuito integrado UC3854A.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

3. Descripción del funcionamiento del corrector del factor de potencia

En este capítulo se explican los bloques por los que el circuito está compuesto y el funcionamiento de los mismos.

3.1. Descripción de los bloques

El circuito de corrección de factor de potencia de la Figura 6 se caracteriza por poseer una gran cantidad de subcircuitos, los cuales en conjunto dan lugar al circuito completo del PFC.

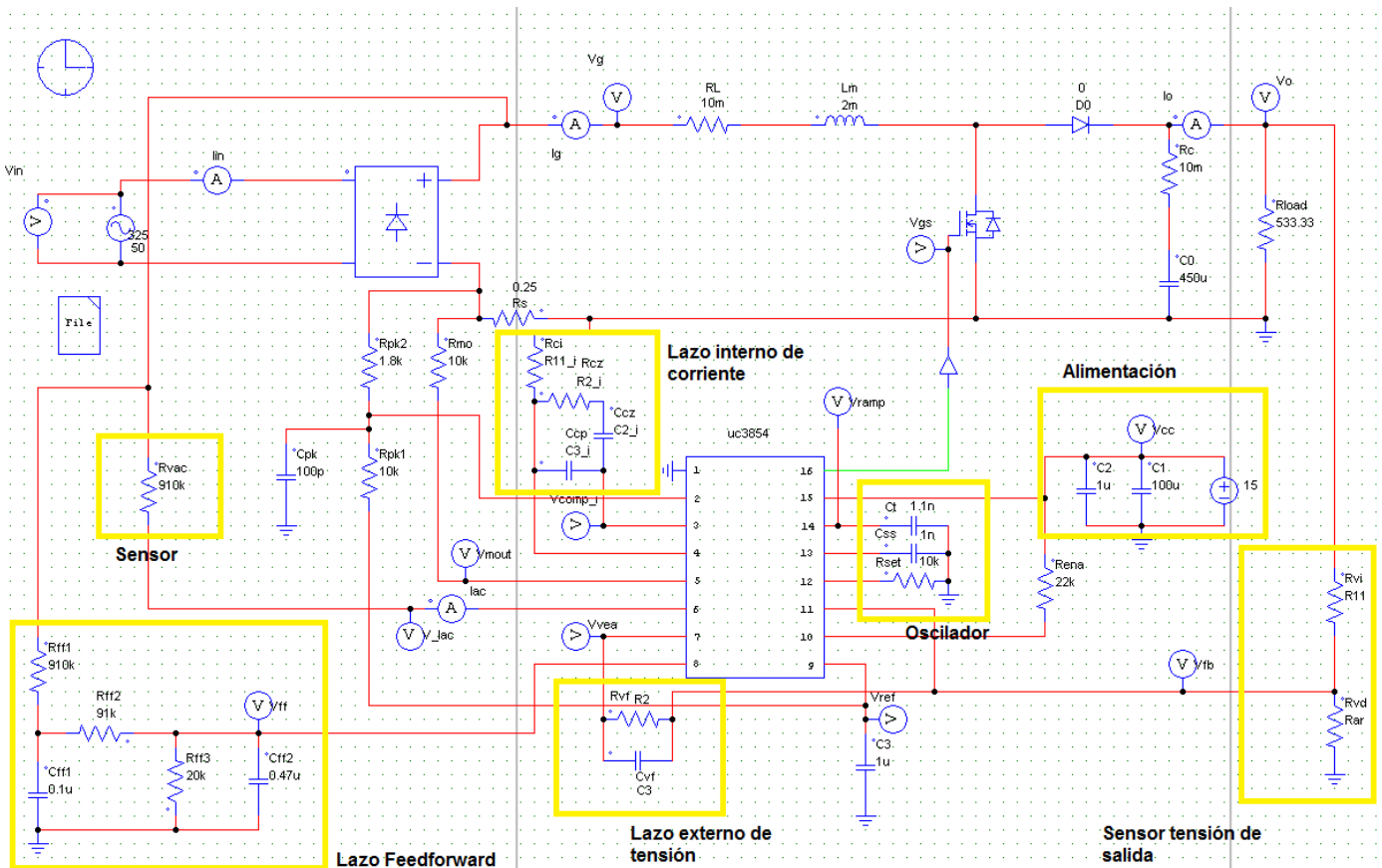


Figura 6 Circuito del PFC



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Para poder comprender mejor el funcionamiento del circuito, se observan las diferentes tensiones y corrientes para cada uno de los bloques.

3.1.1. Etapa de potencia

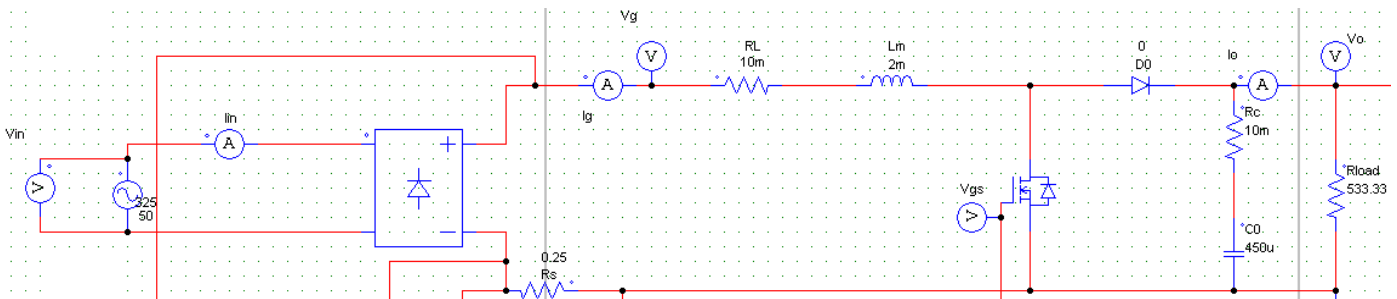


Figura 7 Etapa de potencia

La etapa de potencia es capaz de producir una tensión de salida V_o mayor que la de entrada V_e . La relación entre V_o y V_{in} se calcula según la fórmula

$$V_o = V_g \frac{1}{1 - D}$$

Donde D es el ciclo de trabajo del MOSFET.

Este convertidor elevador tiene los siguientes modos de funcionamiento:

1 Modo de conducción continua (MCC):

Si se supone que el convertidor no tiene pérdidas, la potencia a la entrada del circuito es igual a la salida del mismo.

Cuando el interruptor está cerrado ($0 < t < T_{on}$), toda la tensión de la fuente primaria V_i se aplica sobre la bobina, lo que provoca que la corriente circulante por la misma aumente, almacenando en la bobina energía durante este intervalo.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

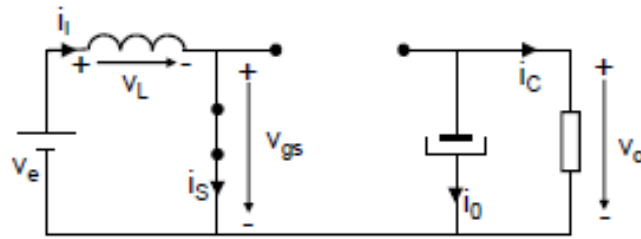


Figura 8 Interruptor cerrado (MCC)

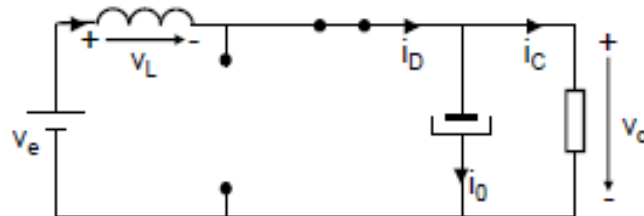


Figura 9 Interruptor abierto (MCC)

La intensidad que fluye por la bobina fluctúa entre unos valores máximo y mínimo, pero nunca llega a anularse. Esto, como se verá más adelante, se debe a la relación entre el tiempo en el que el interruptor se encuentra cerrado, y el tiempo necesario para que la bobina descargue totalmente la energía almacenada previamente.

En el circuito que nos ocupa, para asegurar un régimen continuado, el interruptor deberá estar bloqueado un intervalo de tiempo que permita a la intensidad en la bobina no alcanzar el valor cero. De este modo, al comenzar el siguiente periodo la intensidad en la bobina podrá partir de un valor inicial $I_{L(MIN)}$ distinto de cero.

Según lo descrito, las formas de onda de tensión y corriente del convertidor para los intervalos explicados están representadas en la Figura 10:



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

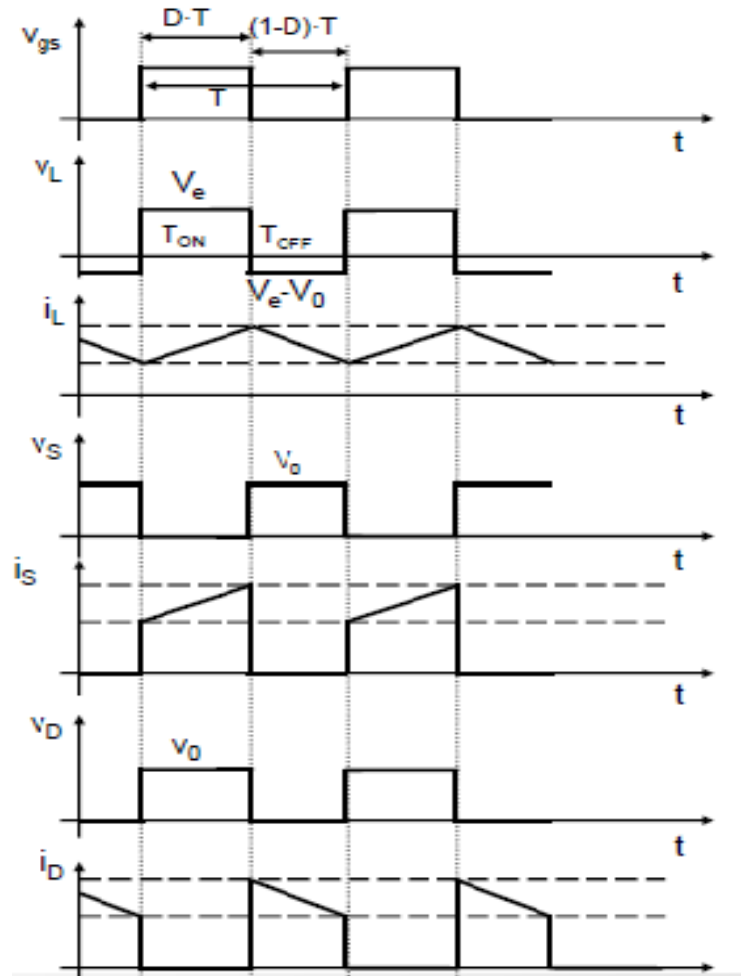


Figura 10 Convertidor elevador (Boost) operando en modo continuo.

2 Modo de Conducción Discontinua (MCD):

El modo de conducción discontinuo se origina debido a que la potencia de salida disminuye y la corriente media de la bobina de iguala a la corriente del diodo.

Si el interruptor se abre ($T_{on} < t < T$), se fuerza una tensión en la bobina correspondiente a la diferencia entre la tensión de entrada V_e y la tensión de la carga V_o .

Al mismo tiempo, la energía almacenada previamente por la bobina se transfiere al condensador de salida y a la carga a través del diodo, obligando a la corriente a disminuir.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

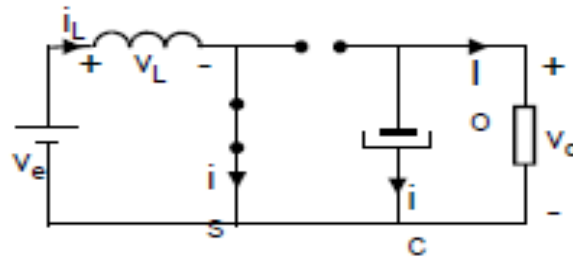


Figura 11 Interruptor cerrado (MCD)

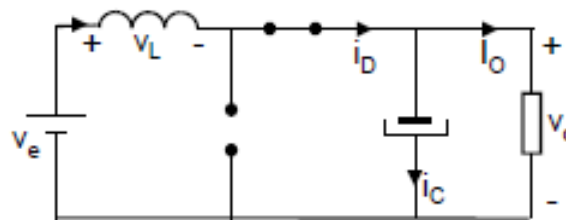


Figura 12 Interruptor abierto (MCD)

En algunas situaciones, la cantidad de energía requerida por la carga es suficientemente pequeña como para ser transferida en un tiempo menor que el tiempo total del ciclo de conmutación.

En este caso, la corriente a través del inductor cae hasta cero durante parte del periodo. La única diferencia en el principio descrito antes para el modo de conducción continuo, es que el inductor se descarga completamente al final del ciclo de conmutación.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

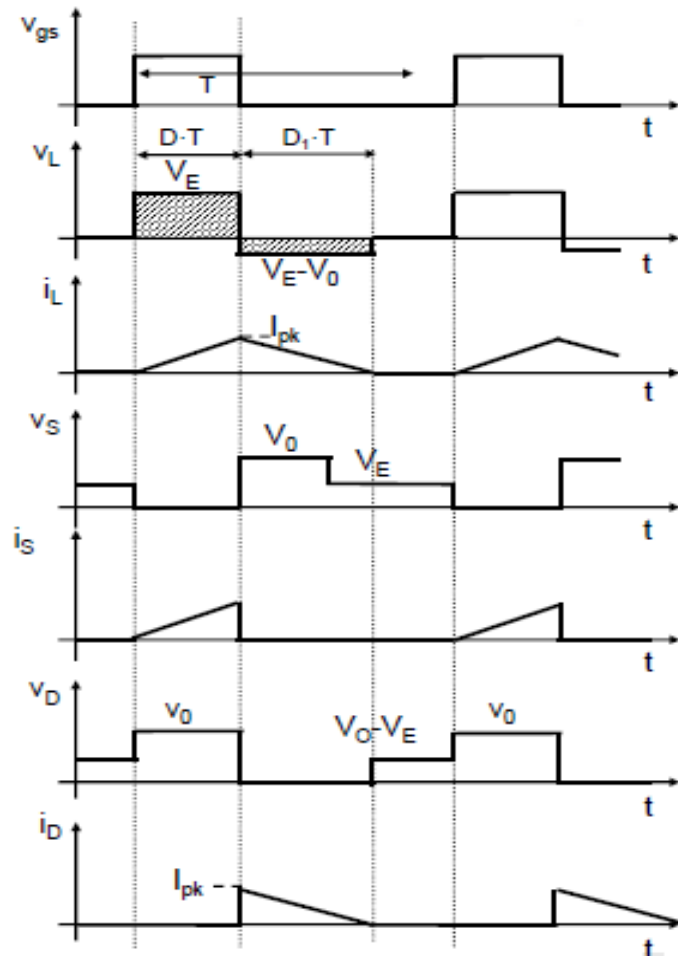


Figura 13 Convertidor elevador (boost) operando en modo discontinuo.

Los elementos parásitos en los elevadores son debido a las pérdidas de la bobina, condensador, interruptor y diodo.

Esto hace que en la práctica, la relación de V_o y V_i de un circuito no se haga infinito cuando el ciclo de trabajo es $D=1$ sino $D=0$.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

3.1.2. Etapa de control

Para controlar el factor de potencia y la tensión de la salida hay que medir la tensión a la salida del rectificador, la corriente del elevador y por último la tensión a la salida del elevador por lo cual se puede separar la etapa de control en los siguientes lazos:

- Lazo externo de tensión
- Lazo interno de corriente y sensado de corriente
- Lazo feedforward

1 Lazo externo de tensión

Para el lazo externo de tensión hay que tener en cuenta que el control de tensión requiere que el ancho de banda sea pequeño a través del filtro formado por el condensador C_3 y la resistencia R_2 . De esta manera se consigue que el rizado de la tensión de salida no interfiera en el control y produzca distorsión.

Las resistencias R_{11} y R_{ar} forman el divisor de tensión por el cual mides la tensión de salida del elevador.

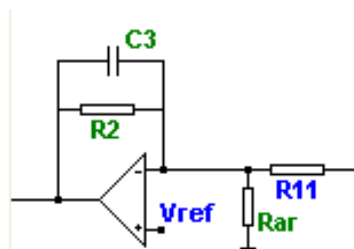


Figura 14 Lazo externo de tensión

2 Lazo interno de corriente y sensado de corriente

Para el diseño de dicho lazo de corriente se tiene en cuenta los siguientes puntos:

- La baja distorsión de la corriente de línea del corrector del factor de potencia del elevador se consigue por un lazo de corriente. Para que la corriente media siga al valor instantáneo de la tensión rectificada, el lazo de corriente fuerza una deriva de corriente correspondiente en la bobina.
- El control del lazo de la corriente media debe poseer altas ganancias en frecuencias bajas, para así, asegurar un buen funcionamiento del convertidor.

CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

- Hay que evitar subarmónicos inestables en el lazo de corriente.

El funcionamiento básico se basa en sensar la corriente que circula a través de la resistencia R_s y compararla con la referencia de corriente proporcionada por la salida del multiplicador. Este multiplicador tiene como entradas la tensión rectificada, la salida del amplificador de error de tensión y la tensión del lazo feedforward, cuyo funcionamiento se explicará en detalle más adelante. Hay que destacar que la multiplicación de estas variables se realiza por medio del circuito integrado UC3854A, el cual aparte posee otras funciones que facilitan el control de este convertidor, las cuales se verán más adelante.

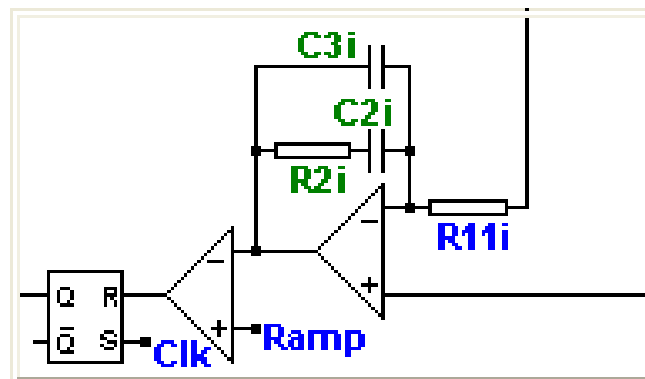


Figura 15 Lazo interno

Para detallar la señal de cada salida se muestra la siguiente figura que aparece en la Figura 16 pero completada por las curvas de las señales tanto de salida como de entrada:

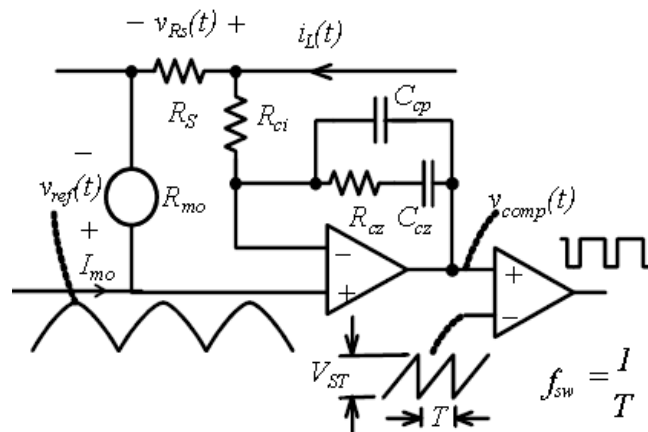


Figura 16 Esquemático del regulador del lazo interno de corriente.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Seguidamente se analizan cada una de las partes fundamentales del lazo interno.

- Sensor de corriente (R_s)

En el caso que aborda este proyecto, se ha hecho uso del sensado a través de la resistencia, puesto que no se va a trabajar con potencias elevadas.

La limitación de la corriente de pico en el UC3854A, hace que este se apague cuando la corriente instantánea llega a exceder su valor máximo y se activa cuando el pin-2 del integrado está a tierra.

El valor de la corriente limitada se activa por un simple divisor de tensión que proviene de la tensión de referencia del sensor resistivo de corriente.

$$R_{pk2} = \frac{V_{rs} \cdot R_{pk1}}{V_{ref}}$$

Donde la tensión de referencia (V_{ref}) para el UC3854 es de 7,5 V. Los valores de R_{pk1} y R_{pk2} son las resistencias del divisor de tensión y V_{RS} es la tensión que cae en la resistencia del sensado R_s , el cual es el punto encargado de la limitación de la corriente.

Los valores de cada componente se han calculado mediante el programa Smart CTRL.

3 Lazo Feedforward

Desempeña un papel fundamental dentro del circuito para corregir el factor de potencia, puesto que permite soportar tensiones de alimentaciones dentro de un rango determinado.

Por regla general, el integrado UC3854A opera con un rango de la tensión de feedforward, de 1.4 a 4.5 V. Dicho integrado, contiene en su interior un limitador interno que limita el valor máximo de V_{FF} (4.5 V) cuando este es superado. El divisor de tensión del lazo para V_{FF} contiene tres resistencias y dos condensadores, obteniéndose de esta manera dos filtros.

Hay que tener en cuenta que el ancho de banda del lazo de tensión se selecciona de valor menor que la frecuencia de red; de esta forma, el lazo feedforward mantiene la ganancia del lazo de tensión constante por lo que el ancho de banda se puede aproximar mucho a la frecuencia de red. Este lazo hace que el bucle de tensión realice un control de potencia.

Durante este control se introducen segundos armónicos con respecto a la frecuencia de red, debido al rizado que se introduce en la tensión de salida, y al correspondiente rizado del lazo feedforward.



4. Diseño del corrector del factor de potencia de un convertidor elevador

4.1. Diseño de la etapa de potencia mediante PSIM

Para el dimensionamiento de la etapa de potencia, explicado anteriormente en el apartado 3.1.1, es necesario determinar las características de los componentes que lo forman. Estos son:

- Bobina: Pérdidas, el tipo de núcleo, tipo de cable, nº de espiras, inductancia, entrehierro, incremento de temperatura.
- MOSFET: Frecuencia de conmutación, pérdidas de conducción y de conmutación, tensión y corriente máxima, incremento de temperatura.
- Diodo: Pérdidas de conducción y de conmutación, tensión y corriente máxima, incremento de temperatura.
- Rectificador: Pérdidas de conducción, tensión y corriente máxima, incremento de temperatura.
- Condensadores: Tensión máxima, capacidad, corriente máxima y eficaz, incremento de temperatura.
- Sensor de corriente: Tensión y corriente máxima, precisión.
- Otros componentes pasivos: Condensadores y resistencias auxiliares.

Los estreses máximos de los componentes se han determinado mediante simulación con PSIM.

Bobina

La bobina debe tener las siguientes características:

- Inductancia $L = 1\text{mH}$
- Corriente máxima permitida $I_{\text{máx}} = 3.1\text{A}$
- Tensión máxima permitida $V_{\text{máx}} = 400\text{V}$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

MOSFET (IRF840)

- Tensión máxima que puede haber entre drenador y surtidor $V_{DSS} = 500V$
- Corriente permitida en el drenador $I_D = 8A$
- Valor resistivo en el drenador $R_{DS(on)} \leq 0.85\Omega$
- Potencia máxima de disipación $P_{disipación} \approx 125W$

Diodo (HFA08TB60)

Los diodos deben tener las siguientes características:

- Tensión máxima que soporta $V_R = 600V$
- Corriente máxima soportada $I_F = 8A$
- Tensión umbral $V_F \leq 1.0 V$

Rectificador (GBJ604)

- Tensión máxima permitida $V_{m\acute{a}x} = 400V$
- Corriente máxima soportada $I_{m\acute{a}x} = 4 A$
- Tensión umbral por cada diodo $V_{fm} = 1V$

Condensadores de entrada

Los condensadores de potencia deben tener las siguientes características:

- Valor del condensador $C = 2 \times 1 \mu F$ (no electrolítico debido a su inestabilidad)
- Tensión máxima soportada por el condensador $V_{m\acute{a}x} = 450V$
- Corrientes soportada $I_{m\acute{a}x} = 100uA$

Resistencia

- Valor resistivo $R = 0.25 \Omega$
- Potencia soportada por la resistencia $P = 3W$
- Tolerancia : $\pm 1\%$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

4.2. Diseño de la etapa de control mediante SmartCTRL

SmartCTRL es un software de control de propósito general, diseñado específicamente para aplicaciones de electrónica de potencia.

De esta manera se hará más fácil diseñar un corrector del factor de potencia de un convertidor elevador.

En la Figura 17 se observa el esquemático del convertidor elevador realimentado a la salida a través de un divisor de tensión. El valor obtenido se compara con una tensión de referencia V_{ref} que tiene como salida la tensión V_{vea} que se multiplica por la tensión de salida del rectificador. La tensión obtenida se filtra a través de un filtro de paso bajo para así obtener la tensión continua deseada.

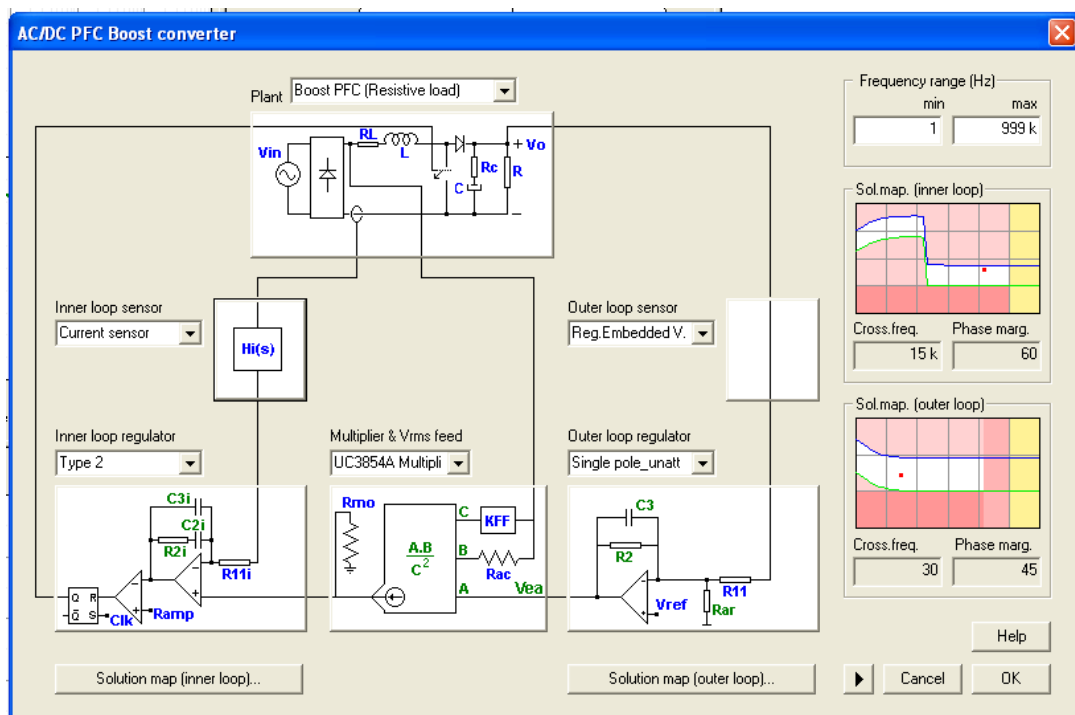


Figura 17 PFC Boost converter



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

El circuito incluye el bucle interno de corriente y el bucle externo de tensión. Los parámetros de bucle de corriente del regulador son la resistencia R_{CZ} y las capacidades C_{CZ} y C_{CP} , los parámetros reguladores de voltaje son la resistencia R_{VF} y capacitancia del C_{VF} .

- configuración del convertidor elevador definiendo los siguientes valores anteriormente obtenidos a través de PSIM

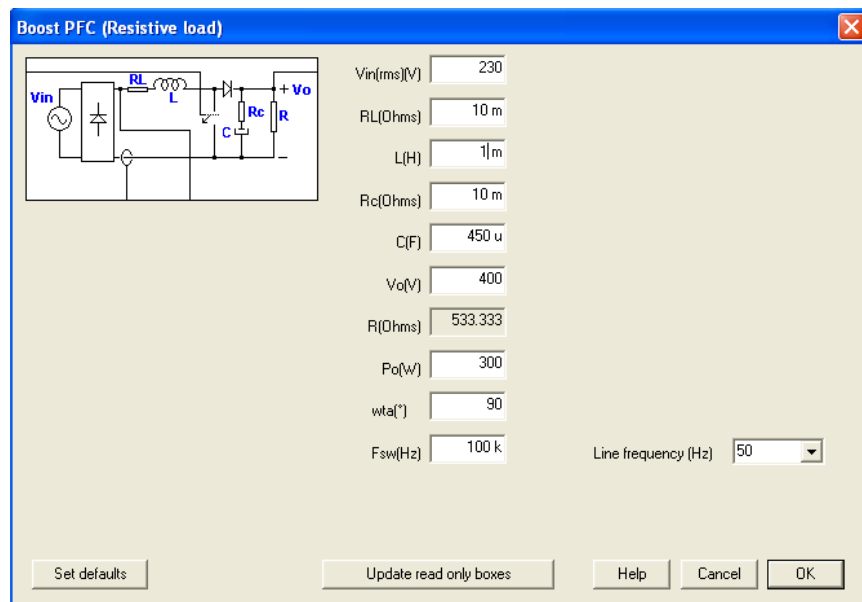


Figura 18 Configuración del convertidor elevador

- la ganancia del sensado de la corriente

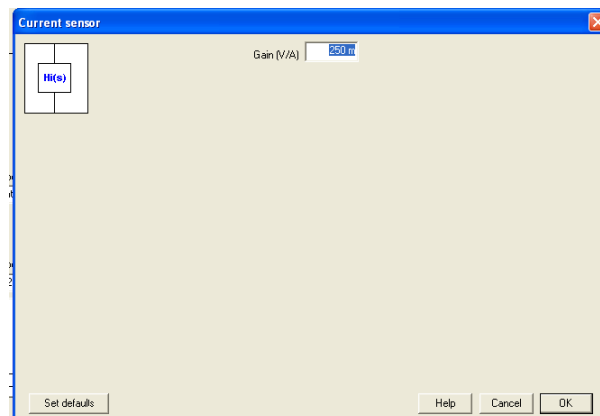


Figura 19 Sensor de corriente



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

- Bucle del regulador, lazo interno de corriente :

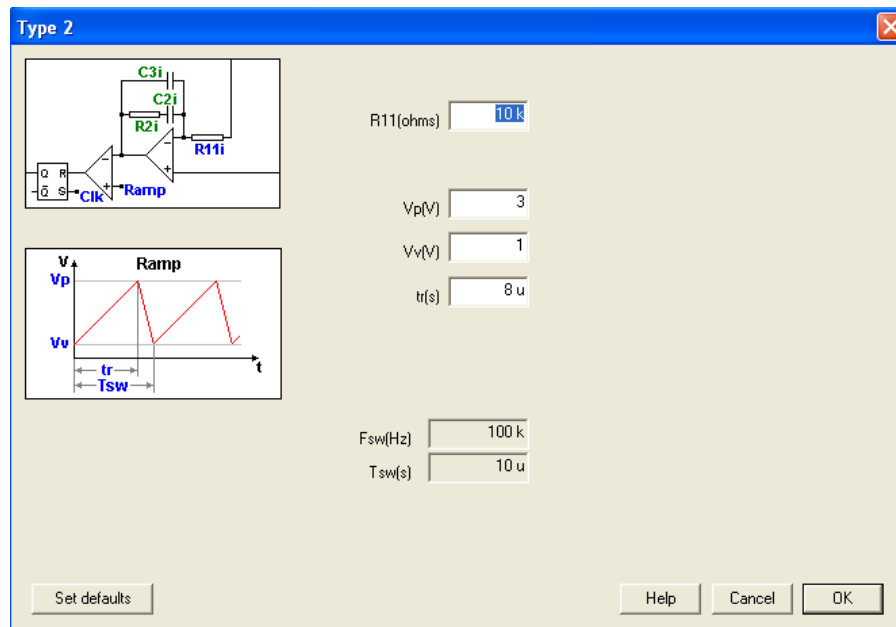


Figura 20 Inner loop regulador

- Valores del integrado UC3854A

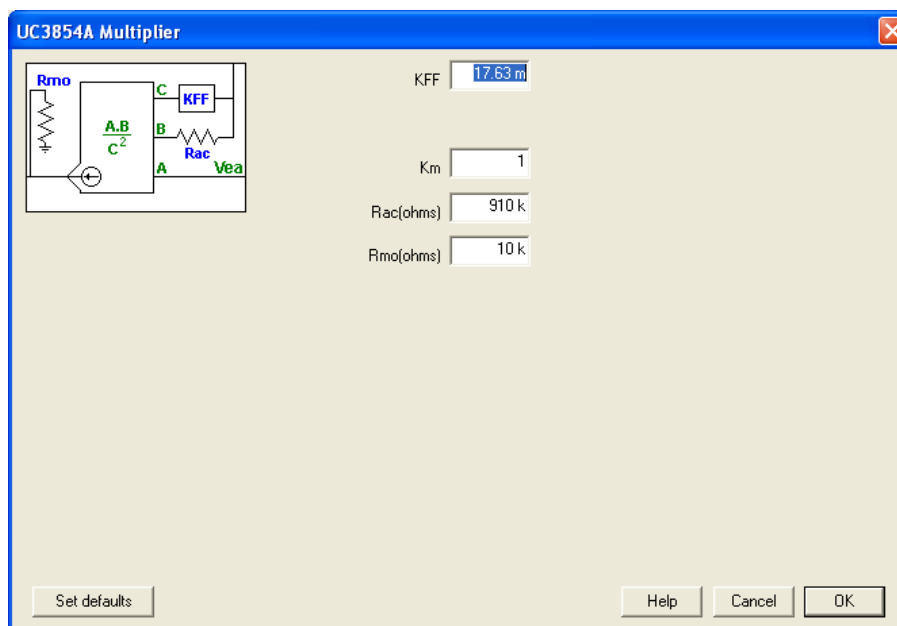


Figura 21 UC3854A Multiplier



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

- Regulador del lazo externo con tensión de referencia de 7,5V y divisor de tensión de salida del convertidor elevador

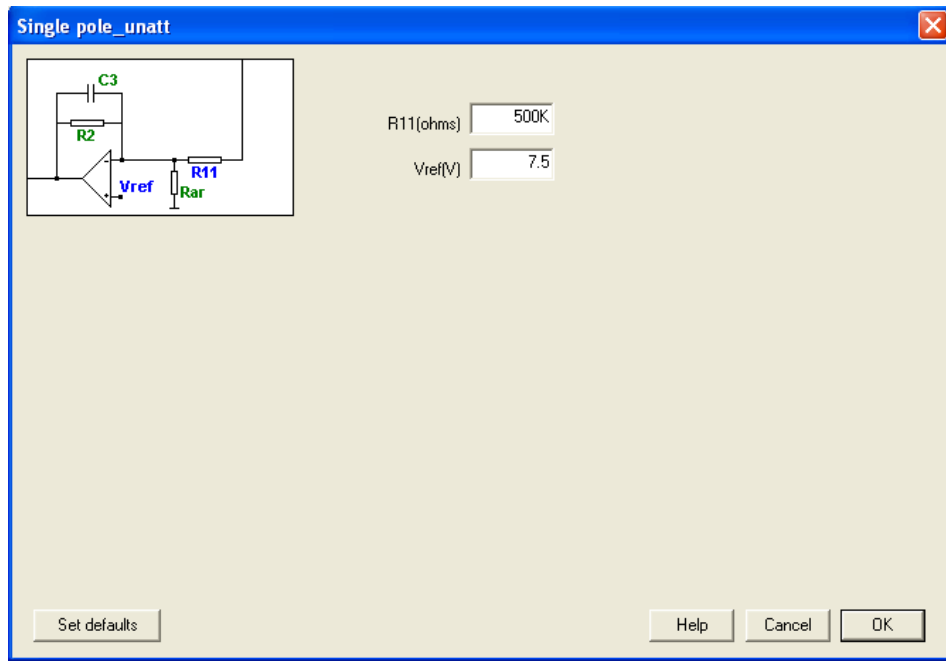


Figura 22 Single pole

Después de seguir los pasos, se muestran las simulaciones de los diagramas de bodes tanto de la fase como de la ganancia.

También se representa el diagrama de Niquist para comprobar que es un sistema estable, así como la corriente I_g con respecto del tiempo y las tensiones que generan el controlador.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

- La fase y el módulo del lazo interno de corriente, se simulan con valores de 15KHz de frecuencia y 60° de margen de fase. Se utilizan estos valores en concreto puesto que un valor menor no llegaría a muestrear a tiempo la señal por lo tanto se pierde información de la onda. En cambio si fuera mayor el valor de la frecuencia, el muestreo sería más rápido por lo que iría por delante de la señal y también se pierde información.

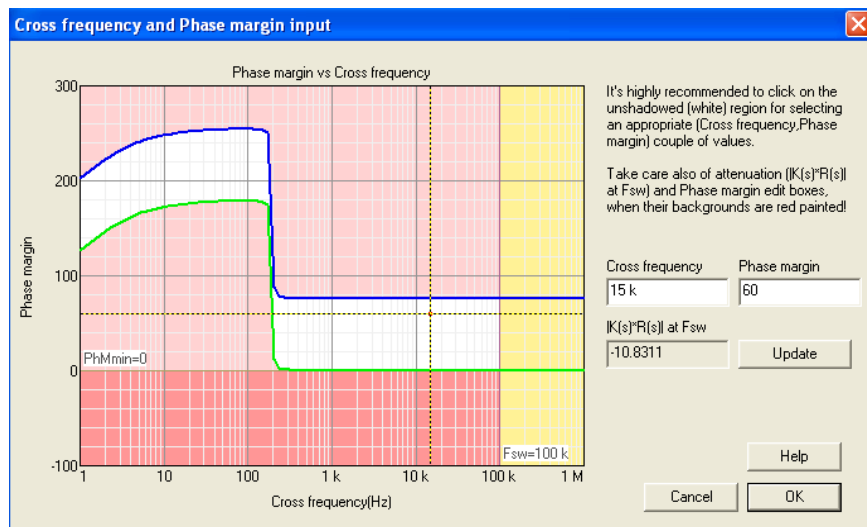


Figura 23 Inner loop

- La fase y el módulo del lazo externo de la tensión con valores de 25Hz de frecuencia y 40° la fase. La razón por la que se escogen los valores es la misma que anteriormente se explicó.

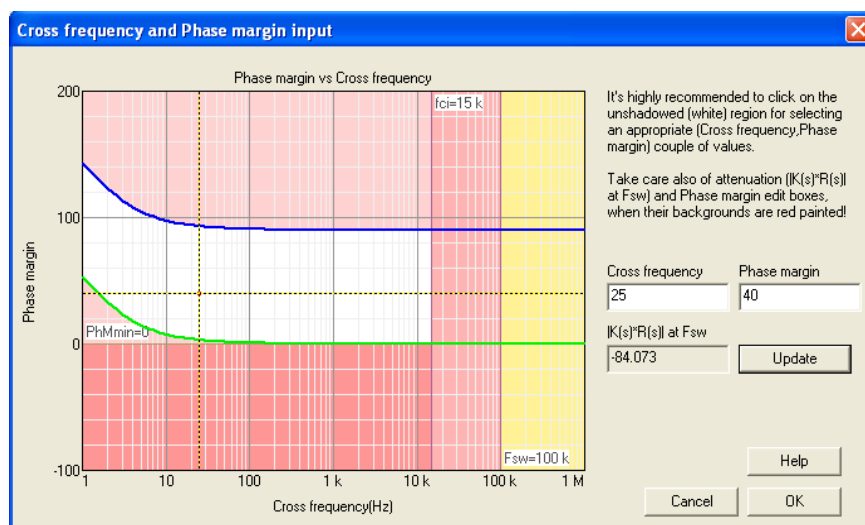


Figura 24 Outer loop



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

A continuación se representa lo explicado en el apartado 3.1.2, tanto con respecto al lazo interno de corriente como en lazo externo de tensión.

En la Figura 25 se observa tanto el diagrama del módulo como de la fase que muestran la estabilidad del sistema. El diagrama de Niquist también muestra que el circuito es estable y al mismo tiempo se observa la corriente I_g que sale del rectificador.

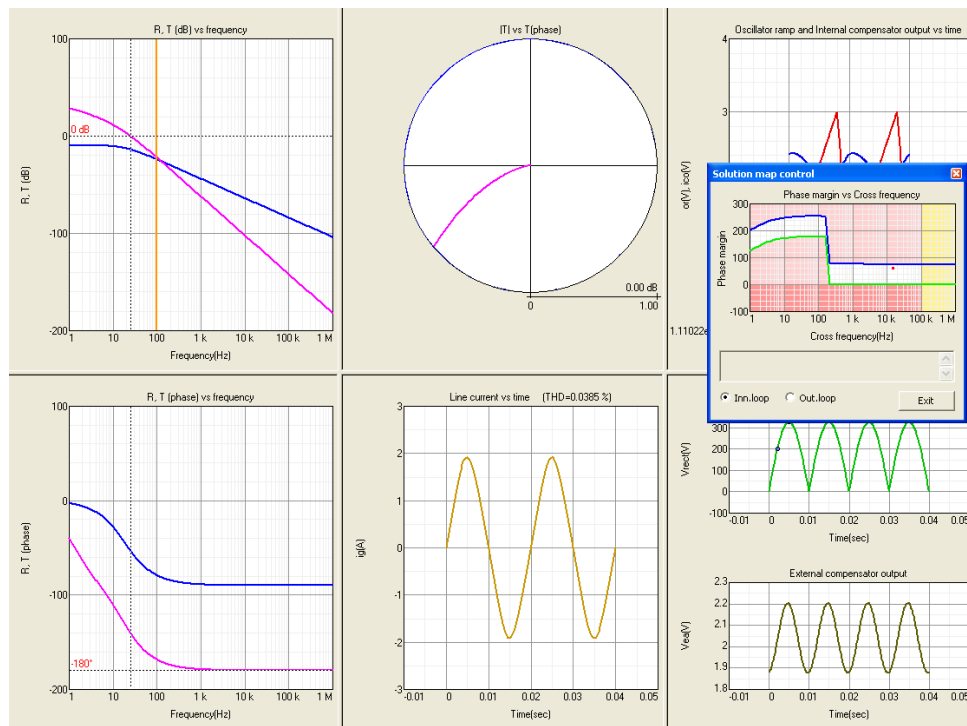


Figura 25 Solución del sistema lazo interno



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

En la Figura 26 se representa la tensión a la salida del rectificador V_{rect} , señal de media onda que llega hasta 325V de pico y V_{ea} la tensión de salida del comparador. Esto es necesario comprobar puesto que la tensión de salida del convertidor elevador se compara con una tensión de referencia. Por lo tanto, la tensión resultante será V_{ea} . Por otro lado, la tensión V_{ea} se multiplica por la tensión rectificada V_{rect} .

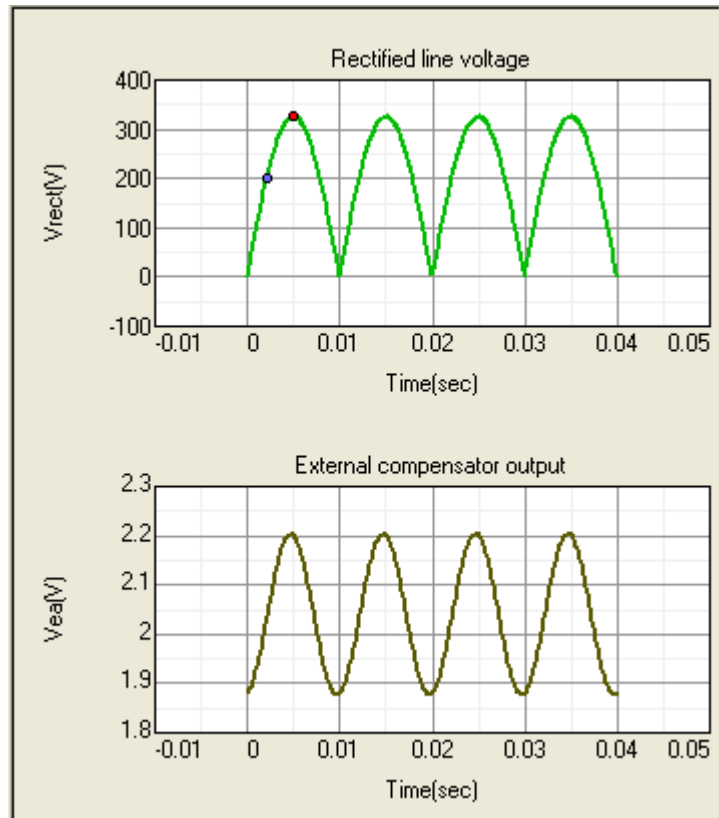


Figura 26 V_{rect} (V) y V_{ea} (V)



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Al configurarse todos los parámetros de lo que va ser el PFC del convertidor elevador, se obtienen los siguientes valores que se utilizarán en PSIM para la simulación.

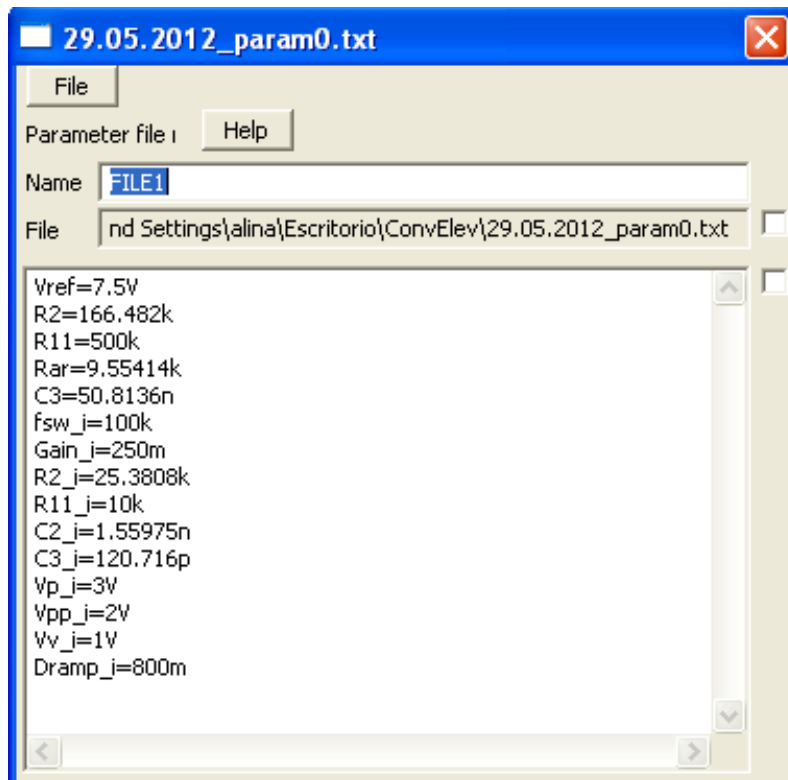


Figura 27 Parámetros del PFC del convertidor elevador



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

4.2.1. Esquemático desde el SmartCTRL al PSIM:

Esquemático del convertidor elevador con bloques de control que corrigen el factor de potencia.

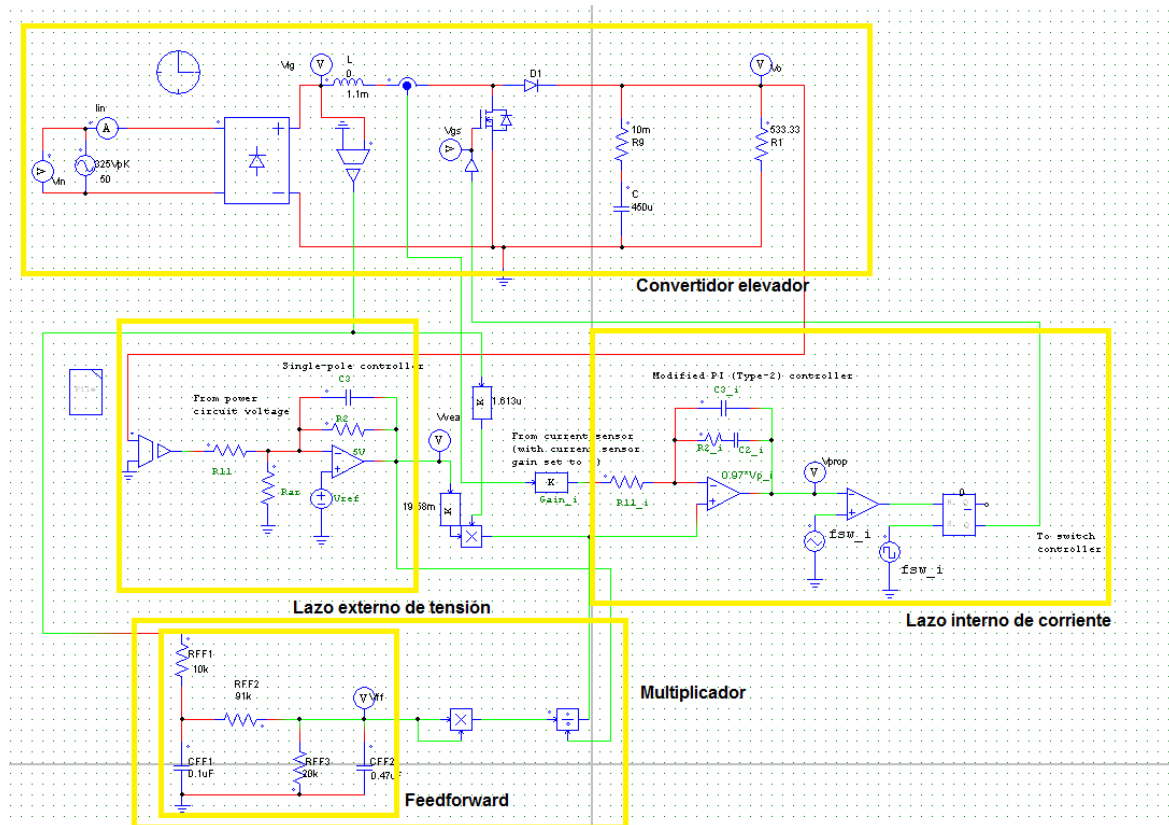


Figura 28 Esquemático con SmartCTRL

Aquí se distinguen claramente los bloques por los que el proyecto está compuesto, la etapa de potencia siendo un convertidor elevador, y la etapa de control que a su vez tiene varios bloques como: el lazo externo de tensión, el multiplicador, el lazo interno de corriente y por último, el feedforward cada uno explicado en el apartado 3.1.



5. Validación mediante simulación del funcionamiento de PFC

5.1. Simulación del convertidor elevador (PSIM)

La etapa de potencia se simula en corriente continua primero con tensión eficaz de entrada

$$V_e = \frac{325}{\sqrt{2}} V$$

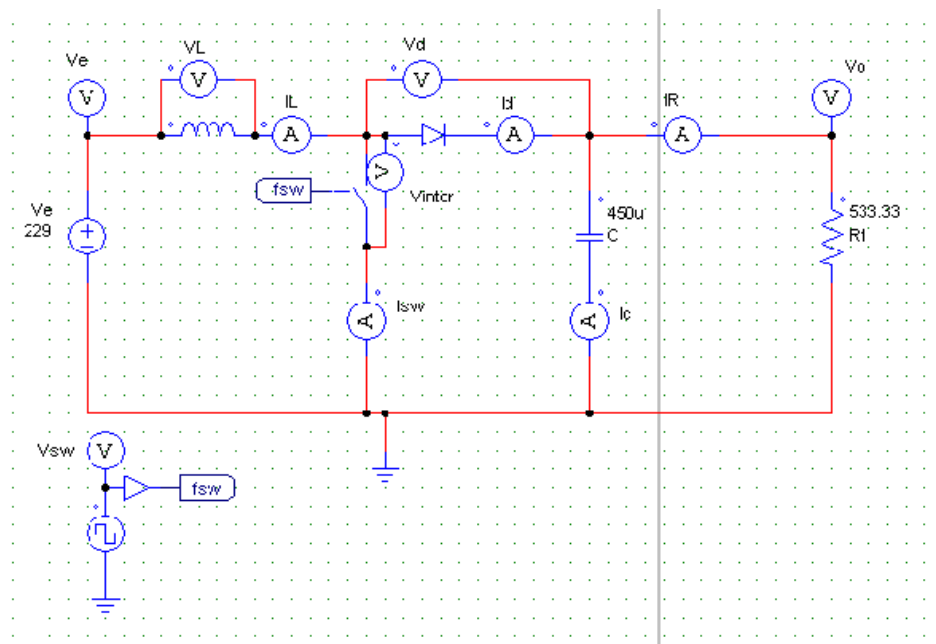


Figura 29 Tensión eficaz de entrada $V_{e(eff)}=229V$

Se miden las señales más relevantes del convertidor elevador para comprobar si con éstos valores tenemos a la salida la tensión deseada, $V_o=400V$.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

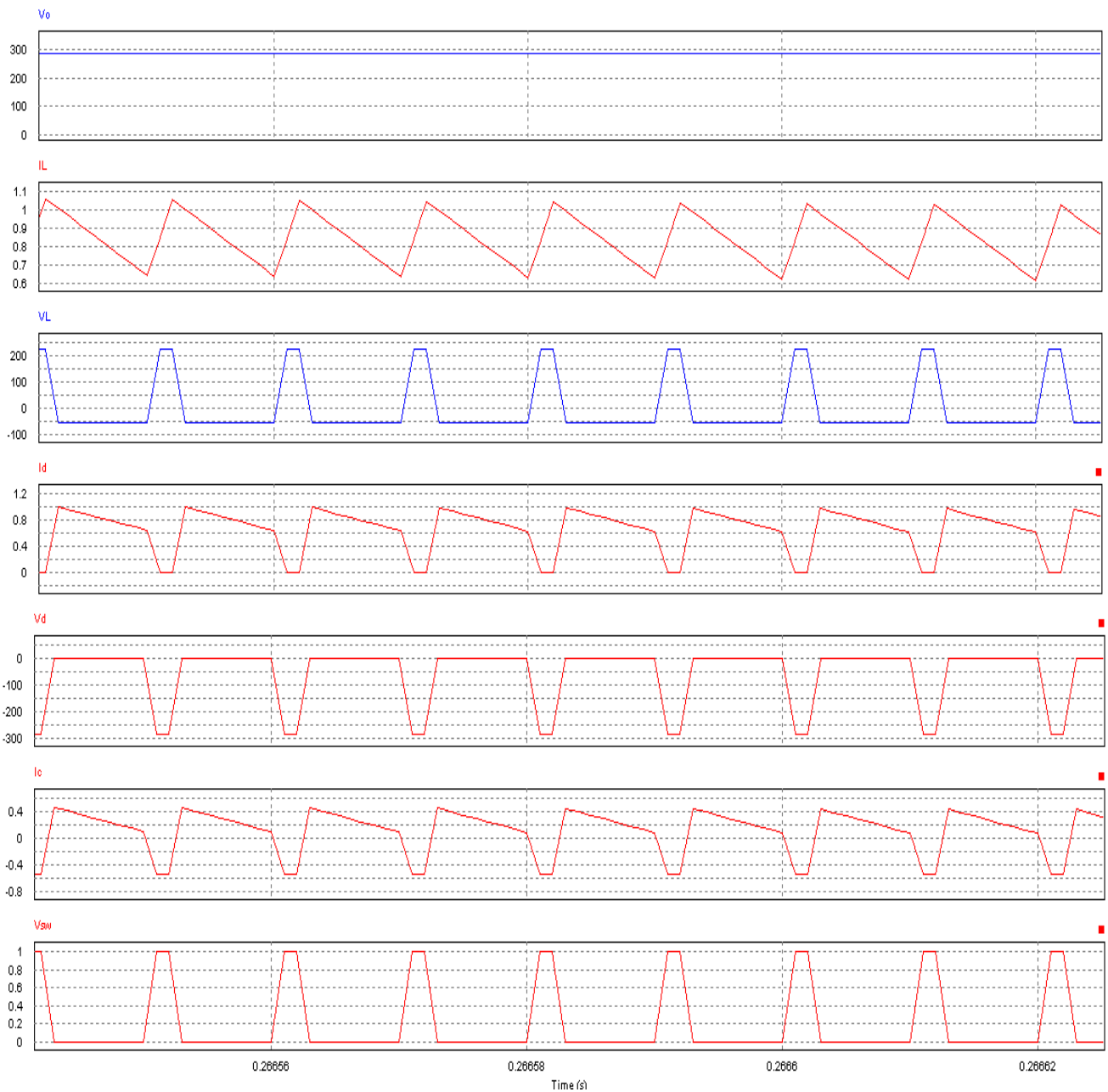


Figura 30 Simulación con tensión eficaz de entrada $V_{e \text{ (eff)}}$

Se observa que con valor eficaz de tensión de entrada, la tensión de salida no llega al valor que se necesita, por lo tanto se simula con tensión de entrada $V_{e \text{ (pico)}}=325\text{V}$.



Se simula el circuito con el nuevo valor de tensión de entrada.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

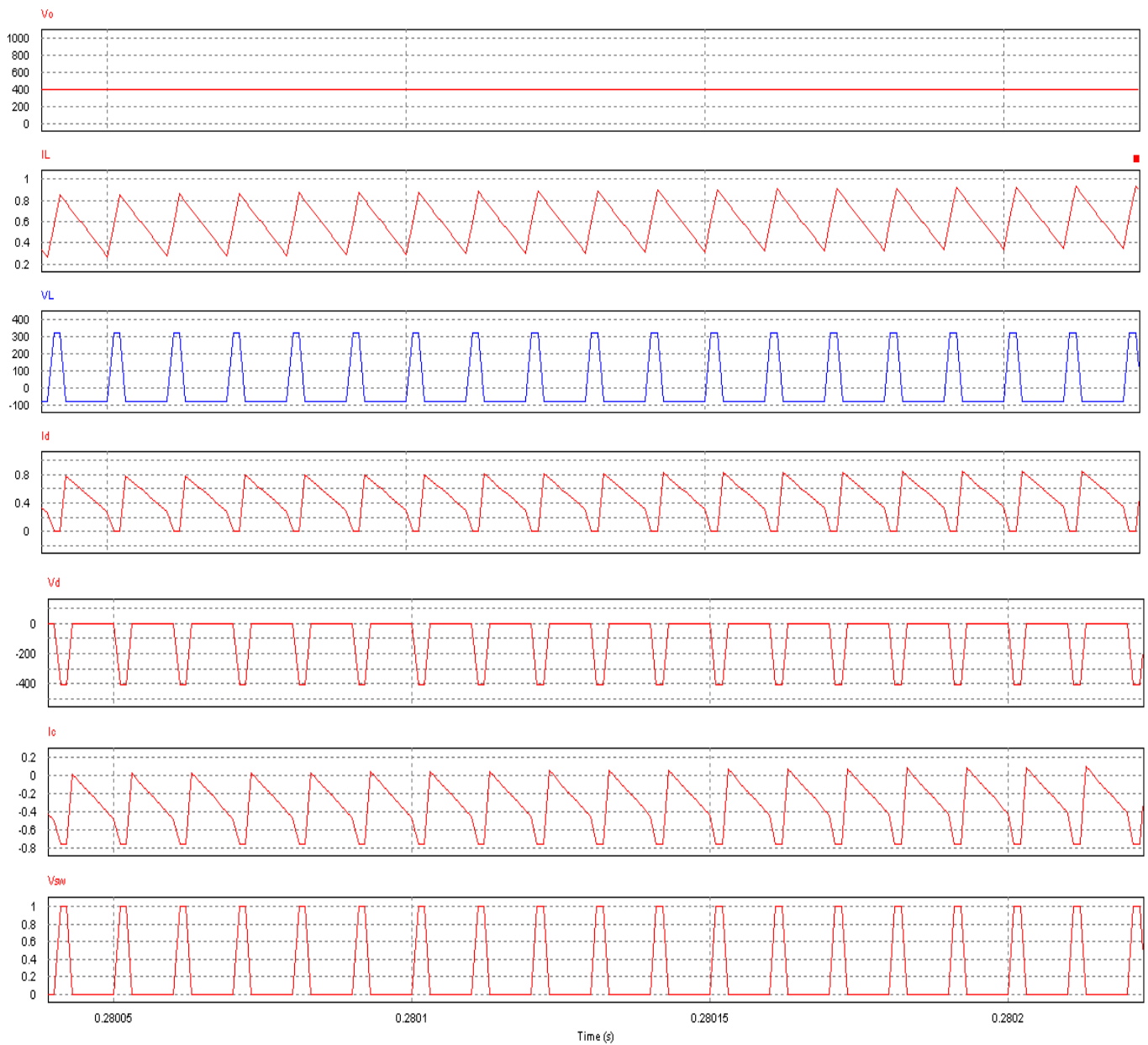


Figura 32 Simulación tensión de entrada V_e (pico)

La tensión de salida V_O es la deseada, por lo que se puede dar por concluido el análisis del convertidor elevador. Dado que los valores simulados son los definitivos, se construye el circuito completo para la corrección del factor de potencia de un convertidor elevador.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

5.2. Simulación del diseño propuesto

Simulación del corrector del factor de potencia de un convertidor elevador:

Se realizan pruebas con bobina de 1mH y condensador de 450uF.

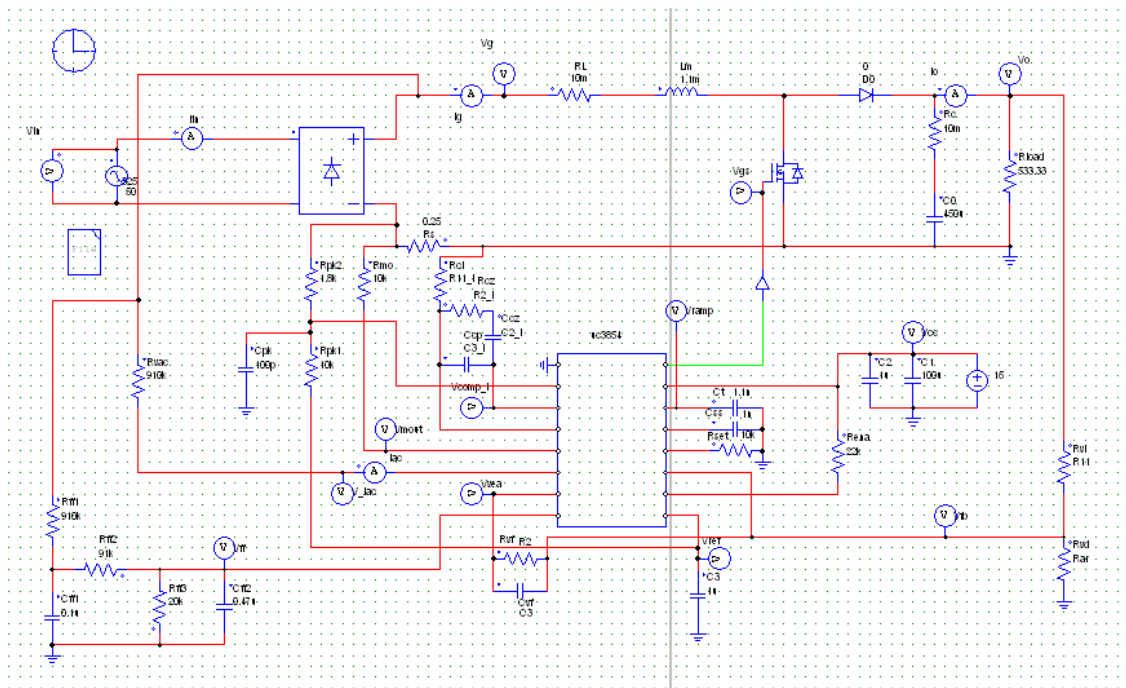


Figura 33 Versión de un condensador 450uF

Los parámetros del fichero (FILE) son los que se han definido a través del programa SmartCTRL que en el apartado 4.2 se detalló.

- ✓ Vref=7.5V
- ✓ R11=511k
- ✓ C3=49.7198n
- ✓ Gain_i=250m
- ✓ R11_i=10k
- ✓ C3_i=40.1361p
- ✓ Vpp_i=5.81V
- ✓ Dramp_i=850m
- R2=170.144k
- Rar=14 k
- fsw_i=100k
- R2_i=76.3344k
- C2_i=518.627p
- Vp_i=6.56V
- Vv_i=750mV



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Valores que se le han dado al reloj para poder simular y ver cómo se comporta el circuito

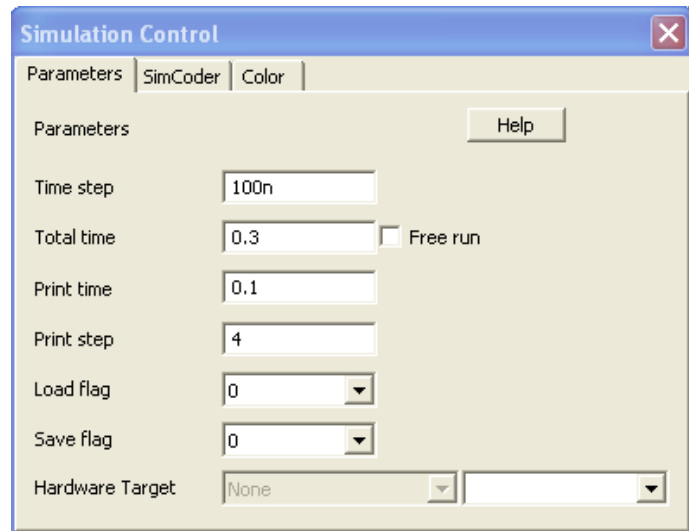


Figura 34 Reloj de simulación

A continuación se observan las corrientes y tensiones del corrector del factor de potencia de un convertidor elevador, tanto de entrada como de salida.

➤ Corriente de entrada

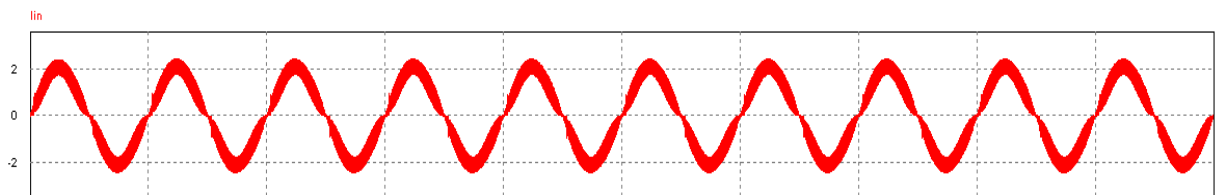


Figura 35 Corriente de entrada

La corriente de entrada es una corriente sinusoidal que llega hasta 2,3 A aproximadamente.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

➤ Corriente de salida:

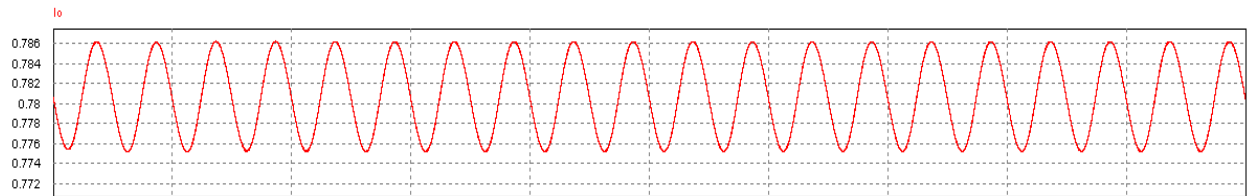


Figura 36 Corriente de salida

➤ Corriente en la resistencia Rs:

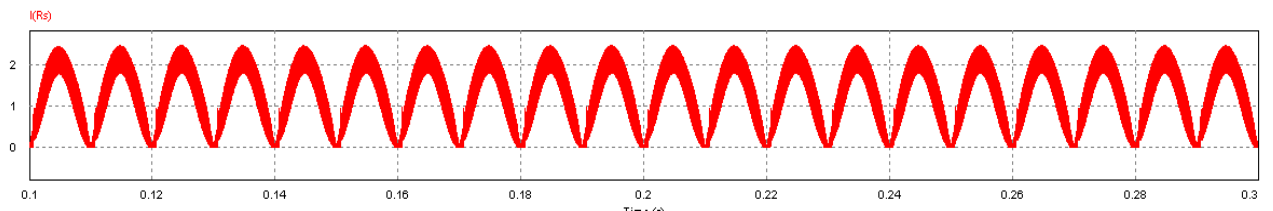


Figura 37 Sensor de salida

➤ Corriente en la bobina, Lm:

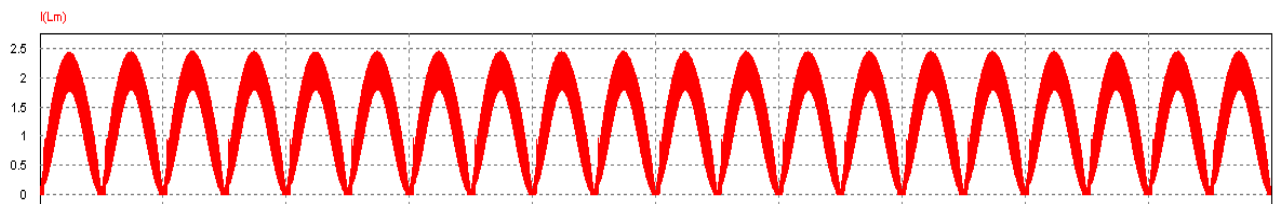


Figura 38 Corriente Lm



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

➤ Tension de salida:

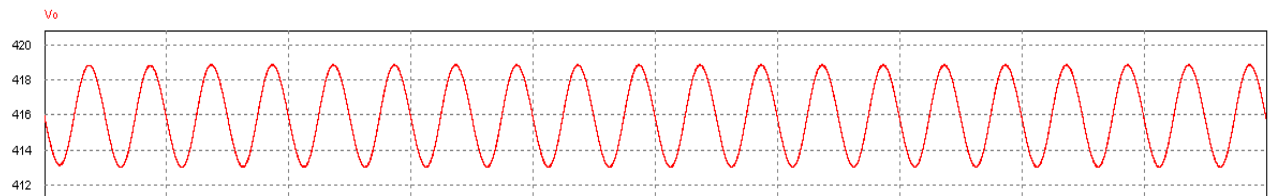


Figura 39 Tensión de salida

➤ Tension del UC3854A:

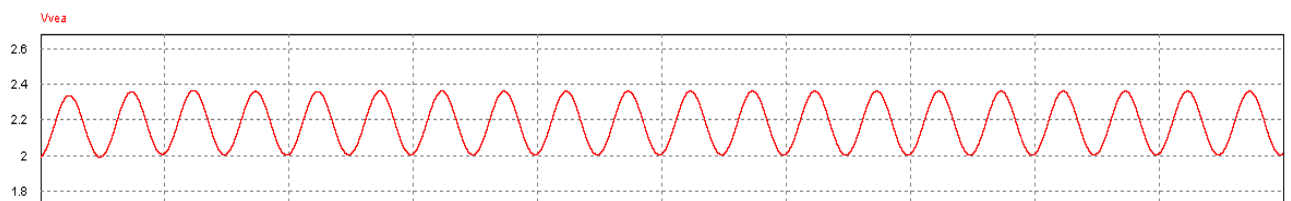


Figura 40 Tensión del controlador UC3854A



Se barajaron varias posibilidades respecto al valor de la bobina, de esta manera se observa cómo cambian las formas de onda y se entiende mejor el comportamiento general del circuito.

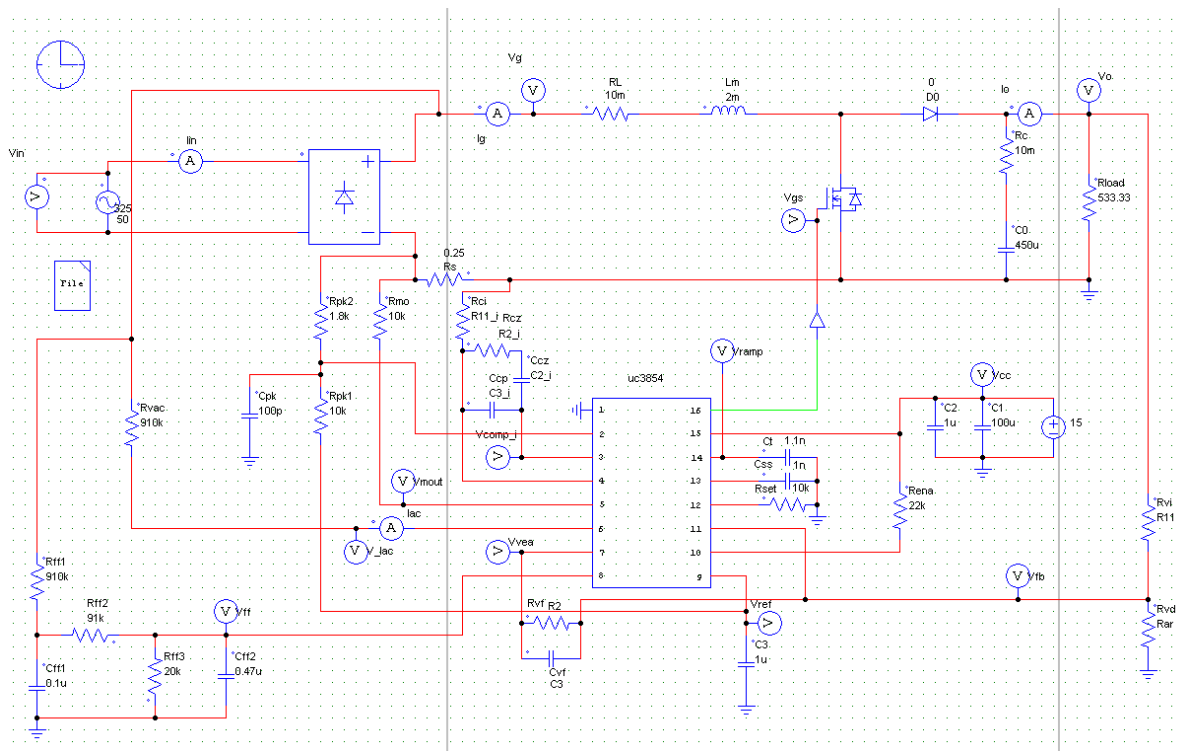


Figura 41 Elevador con bobina de 2mH

Parámetros de la simulación:

- ✓ Vref=7.5V
- ✓ R11=500k
- ✓ C3=2.54068u
- ✓ Gain_i=250m
- ✓ R11_i=10k
- ✓ C3_i=93.2788p
- ✓ Vpp_i=2V
- ✓ Dramp_i=800m



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

➤ Corriente en la entrada:

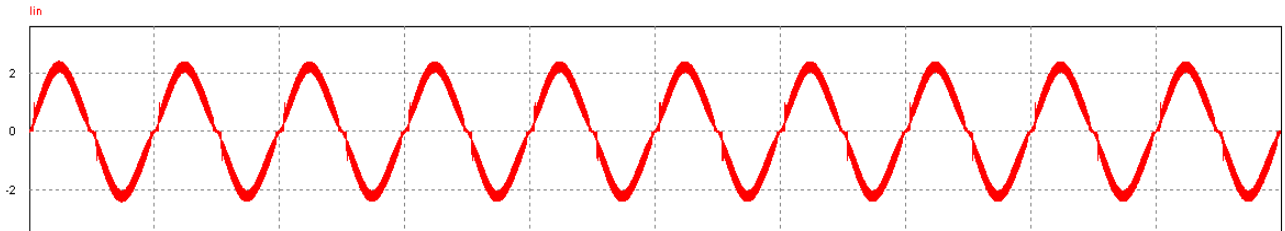


Figura 42 Corriente entrada

➤ Corriente en la bobina:

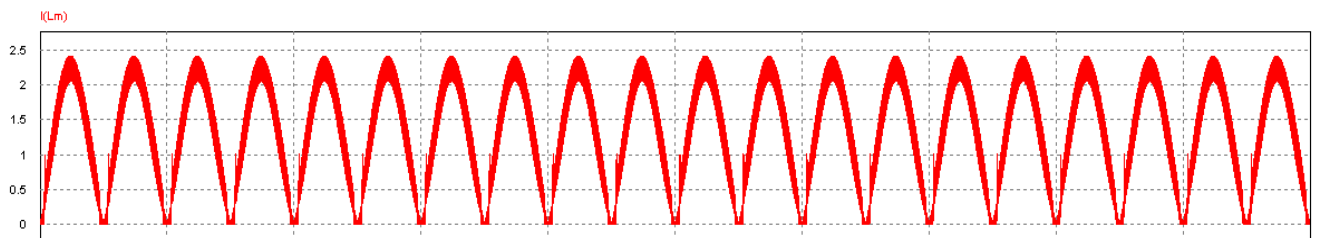


Figura 43 Corriente en la bobina

➤ Corriente salida:

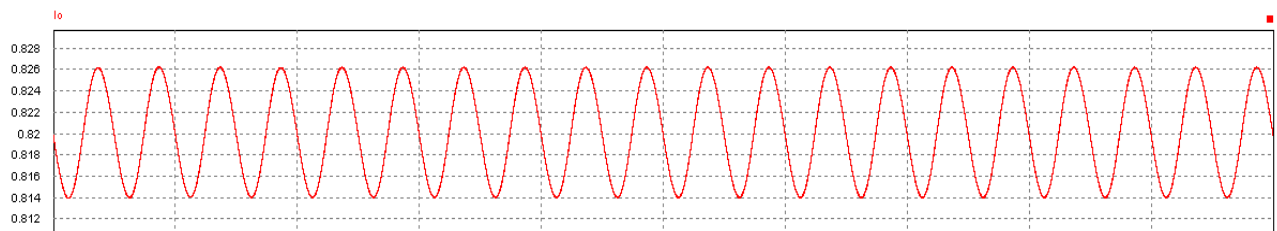


Figura 44 Corriente salida



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

➤ Corriente resistiva R_s :

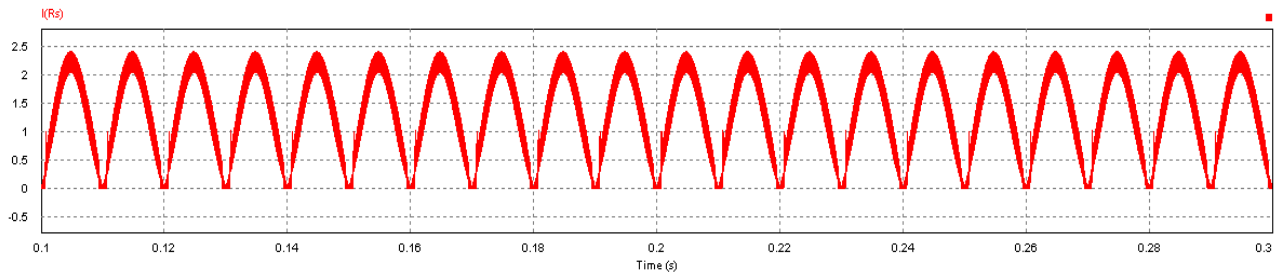


Figura 45 Corriente del sensor

➤ Tensión de salida del comparador

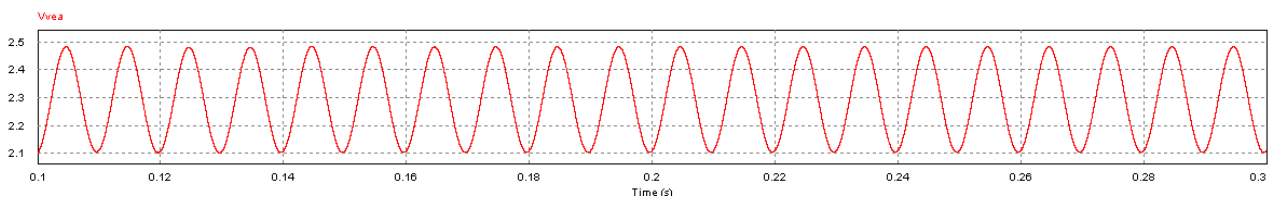


Figura 46 Tensión Vvea

➤ Corrientes en el diodo y el condensador:

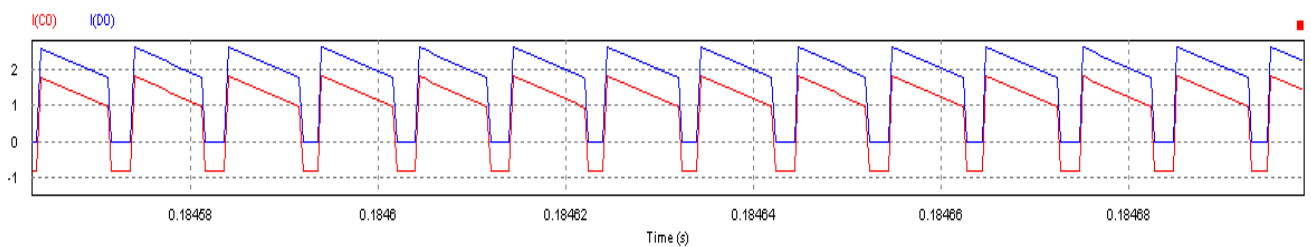


Figura 47 Corriente diodo y condensador



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

➤ Corriente en el MOSFET:

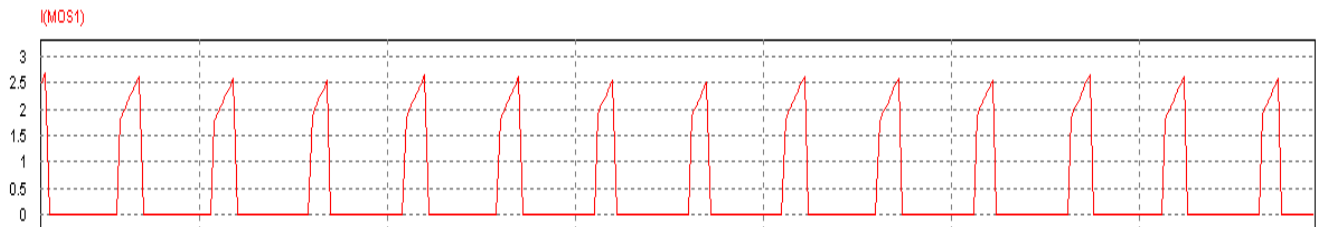


Figura 48 Corriente del mosfet

➤ Tensión de entrada 325V:

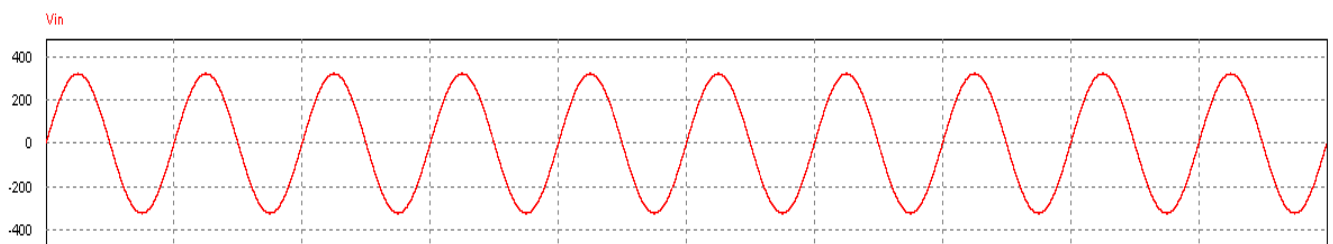


Figura 49 Tensión de entrada



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Como versión final del esquemático, se utilizan dos condensadores en paralelo de 220uF:

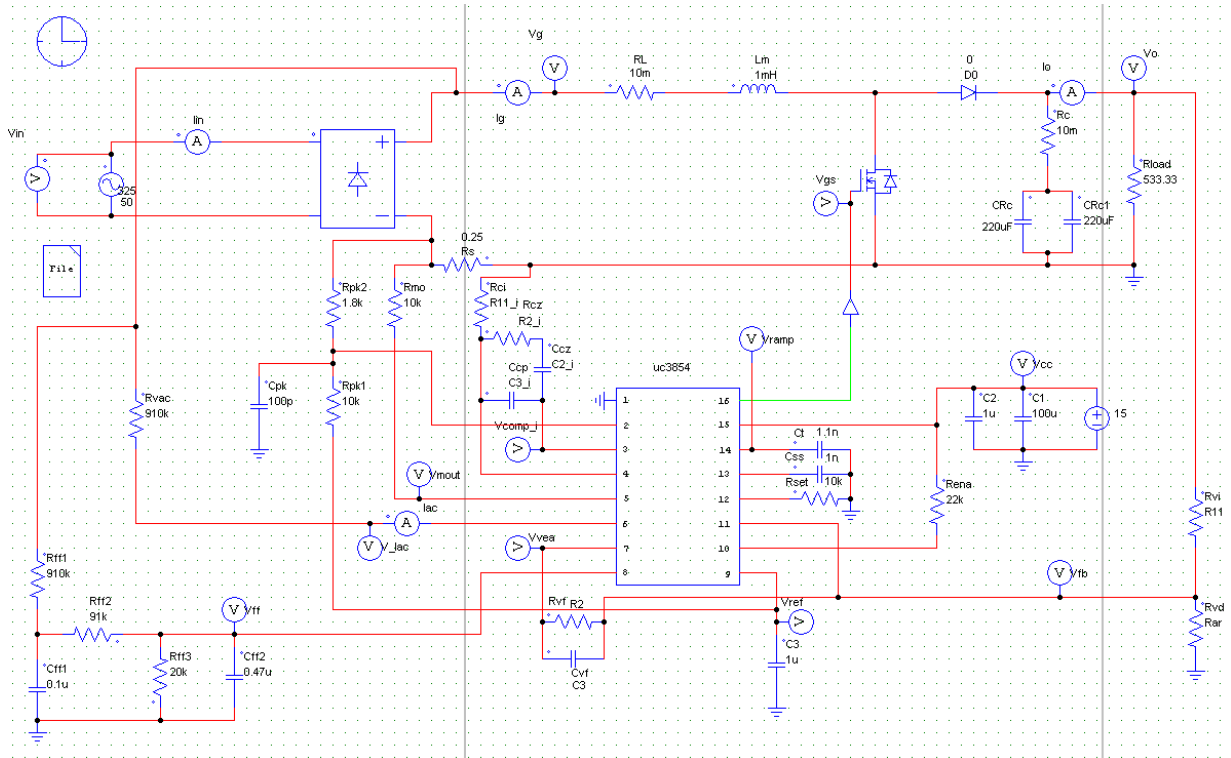


Figura 50 Esquemático definitivo

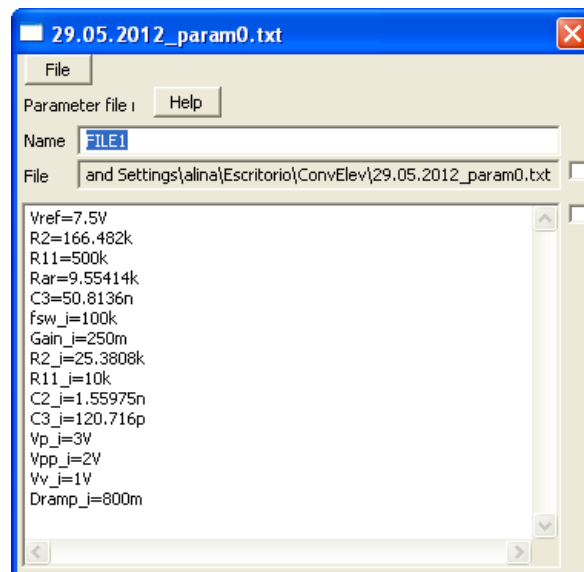


Figura 51 Parámetros de la simulación



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Conclusiones de la simulación:

Como no se han percibido cambios importantes, se dan por válidas las simulaciones anteriores.

Por lo tanto se puede decir que las etapas de potencia y control funcionan acorde a las características mencionadas en el apartado 4.2.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

6. Diseño del prototipo y validación experimental del convertidor elevador

Tras comprobar que el circuito funciona a través de PSim y que coinciden las señales con lo obtenido a través de SmartCTRL, se pasa al esquemático con el programa OrCAD-Capture.

OrCAD es un conjunto de herramientas de software propio que se utiliza principalmente para la automatización de diseño electrónico. El software es usado principalmente por los ingenieros de diseño electrónico y técnicos electrónicos para crear esquemas electrónicos e impresos electrónicos para la fabricación de tableros de circuitos impresos.

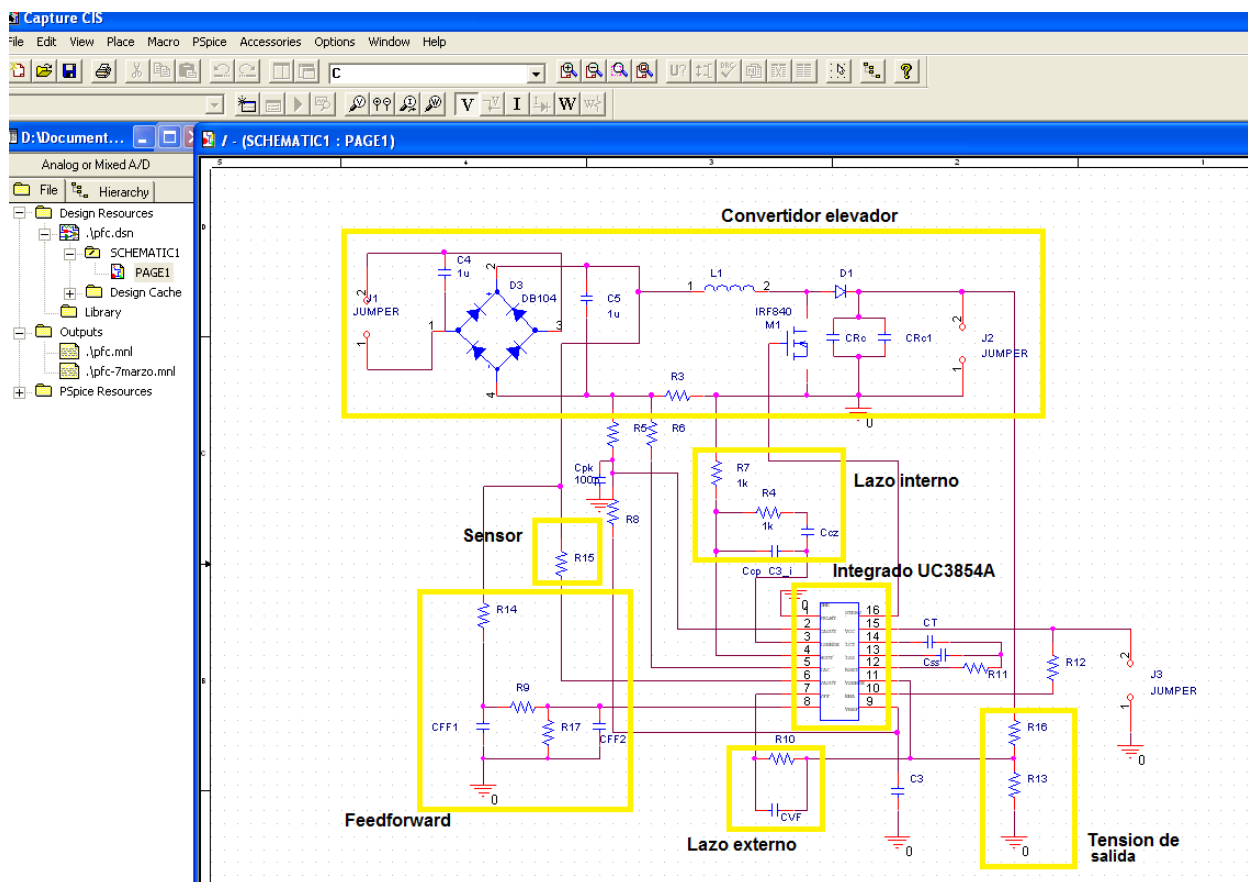


Figura 52 Esquemático OrCAD-Capture



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

6.1. Diseño de la placa PCB (OrCAD-Layout)

PCB:

A la hora de construir el circuito electrónico se recurre a la técnica de circuitos impresos o PCB (Printed Circuit Board). Las ventajas de las PCB son las siguientes:

- Mayor resistencia a la humedad
- Alto aislamiento
- Capacidades parásitas constantes y escasas
- Menor combustibilidad
- Disminución de errores de montaje
- Mayor resistencia mecánica
- Disminución de peso y volumen de los circuitos
- Automatización del proceso de fabricación, montaje y soldadura

La placa base sobre la que se situaran los componentes es de material aislante, normalmente baquelita o fibra de vidrio, y sobre la misma se ha depositado galvánicamente una capa de cobre que será el material conductor. Puede ser monocapa, bicapa o multicapa (con capas intermedias). En este caso, PCB son de dos capas (bicapa).

La fabricación de una placa de circuito impreso consiste en dibujar sobre el cobre las conexiones eléctricas que unirán a los distintos componentes y, a continuación, someter la placa a un líquido corrosivo que elimine las zonas de cobre sobrantes.

Una vez que se tenga la placa acabada, se procede al taladrado para poder situar y soldar los componentes.

El diseño se realiza con el programa ORCAD-Layout.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Criterios básicos de diseño:

Para su diseño se ha tomado los siguientes criterios para que tenga un correcto funcionamiento:

- Todas las pistas deben ser construidas con una longitud lo más reducidas posibles, con el fin de reducir al máximo las impedancias parásitas que aparecen proporcionalmente con la distancia de trazado. Esta norma será especialmente crítica en aquellos subsistemas de control que manejen señales de tensión especialmente sensibles al ruido y sean elementos de especial relevancia en el control y estabilidad del sistema.
- Las pistas que transmitan señales pulsantes guardarán un recorrido paralelo que favorezcan en la manera de lo posible la reducción del área electiva entre pistas; de esta forma la influencia del ruido electromagnético se verá minimizada.
- El ancho de pista en la capa asociada a las pistas de potencia depende del grosor de la capa de cobre y de la corriente que circula por ellas
- El número de vías entre la cara de arriba y la cara de abajo será el mínimo posible
- En este caso se ha optado por la distribución de los componentes para facilitar el reconocimiento de los mismos, frente a una optimización en tamaño.
- Se han distinguido claramente la etapa de control y la etapa de potencia. Cada una ha sido rutada con su propio plano de masa.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

6.2. Construcción del prototipo

Una vez acabado el diseño de la placa se pasa a construir el prototipo.

En las siguientes figuras se pueden observar las pruebas de los componentes sobre la placa para comprobar que las huellas son correctas y encajan perfectamente.

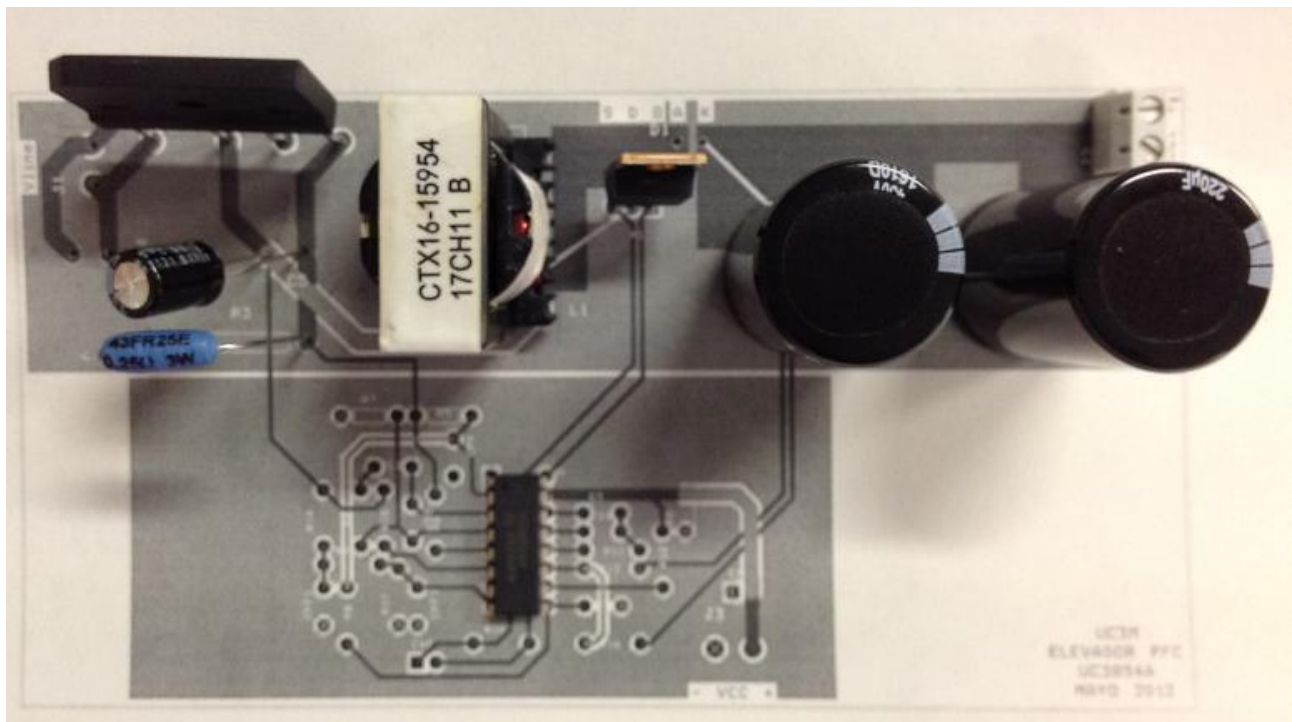


Figura 53 Prototipo PFC Boost



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

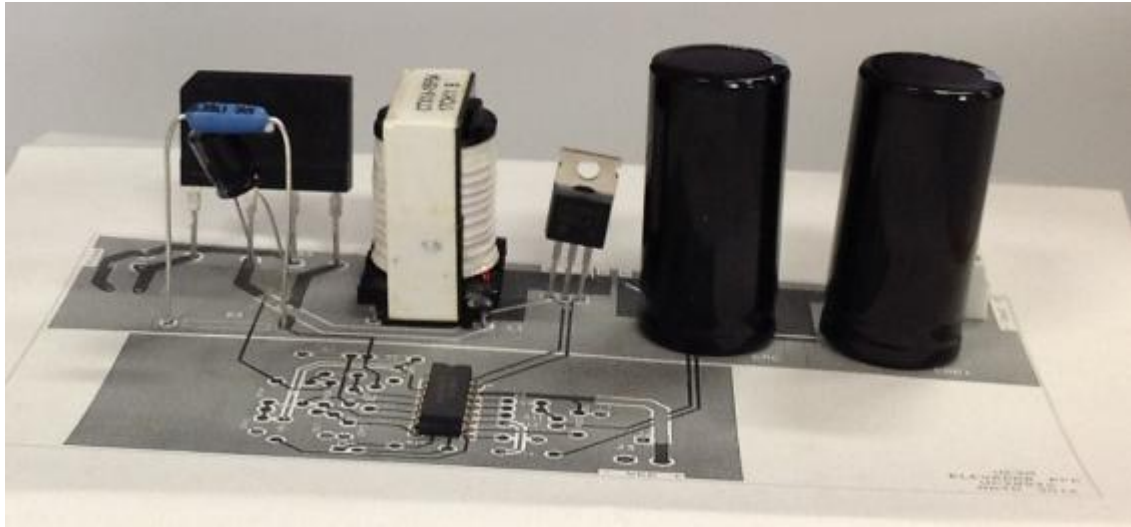


Figura 54 Prototipo de la placa

Como se puede observar, se tiene en la entrada condensadores de $1\mu\text{F}$ para una tensión de entrada de 325 V , un rectificador, una bobina de 1mH de varios devanados, el MOSFET que se comporta como interruptor, los dos condensadores de salida de $220\mu\text{F}$ cada uno, una resistencia de 0.25Ω y por último, el controlador del factor de potencia, el integrado UC3854.

El resto de componentes no se comprueban ya que tienen tamaños estándares y no necesitan una huella especial.

6.3. Validación experimental del prototipo

Condiciones:

Para que se puedan realizar las siguientes pruebas en lazo cerrado se utiliza una fuente de alimentación de corriente continua con un máximo de tensión de 200V en la entrada por lo que se llega a tener en la salida 380V aproximadamente.

Por ello se observa que el convertidor elevador funciona como es debido.

A continuación se puede ver la placa montada íntegramente:



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 55 Elevador PFC



Figura 56 Placa definitiva

Se monta el circuito para poder efectuar las pruebas correspondientes Figura 57 :



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

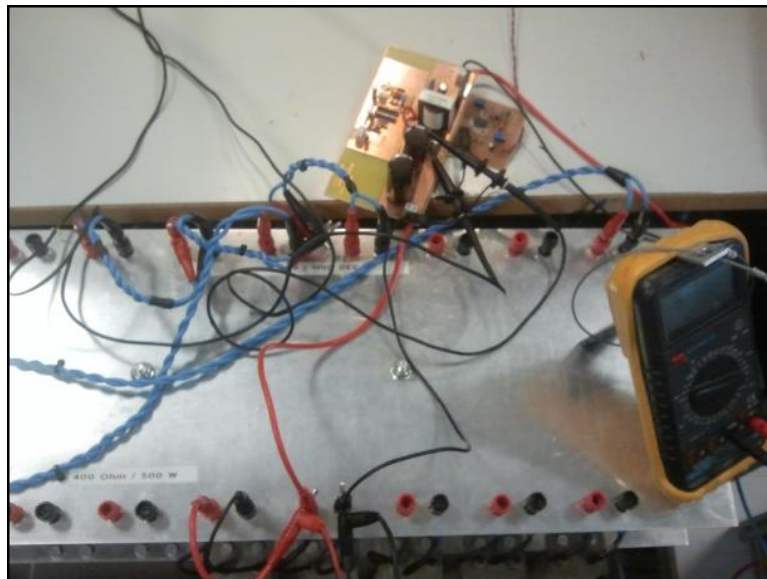


Figura 57 Montaje placa

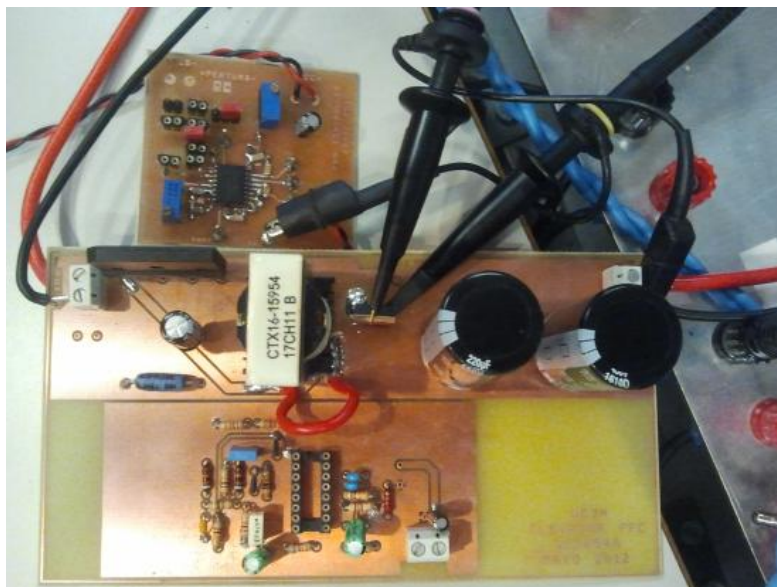


Figura 58 Convertidor elevador con circuito de control

A continuación se observan las gráficas de medidas realizadas con las distintas cargas y tensiones de entrada, mostrando tanto la tensión de salida como el rendimiento

Se empieza con carga de 400Ω y se incrementa la tensión de corriente continua desde una tensión de entrada de $57.8V$ hasta $217 V$ que será el máximo que la fuente puede alimentar.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 59 $V_{in} = 57.8V$

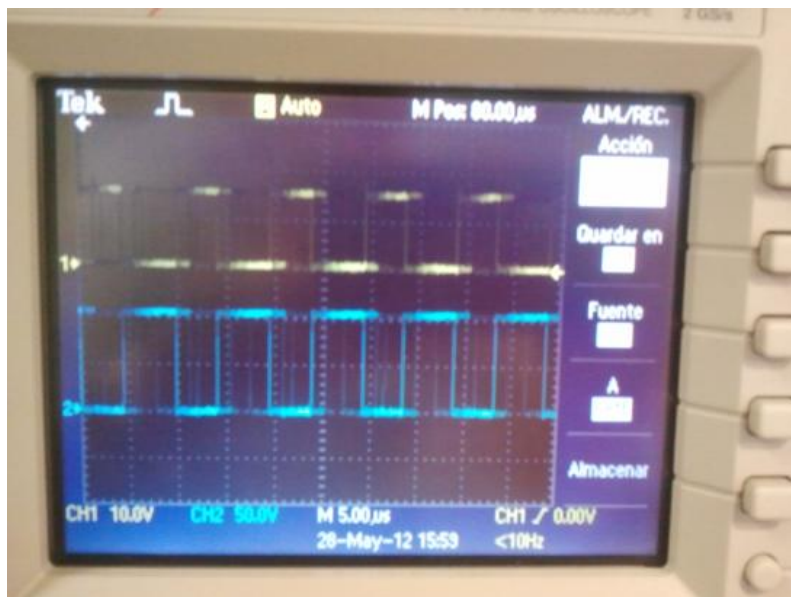


Figura 60 $V_{out} = 100V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 61 $V_{in} = 57.8V$

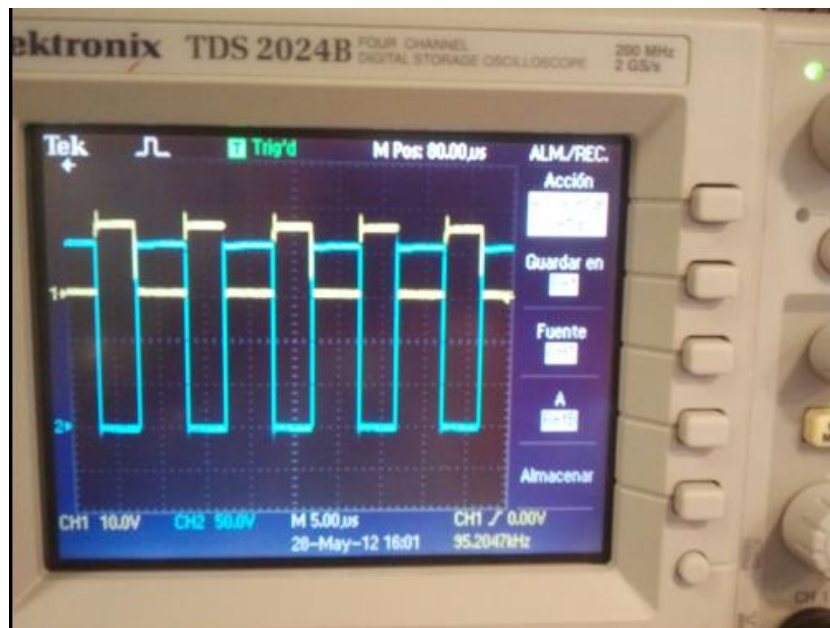


Figura 62 $V_{out} = 200V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

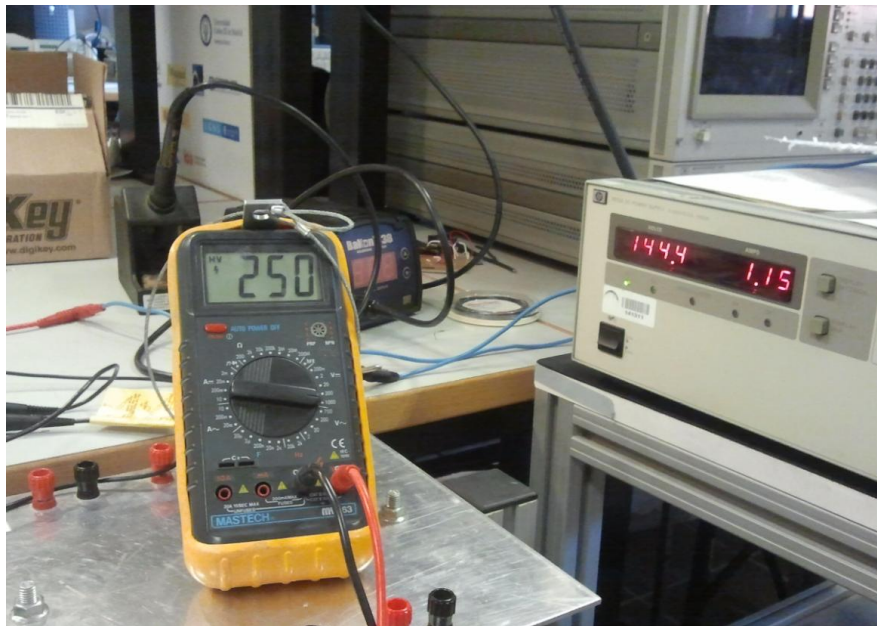


Figura 63 $V_{in} = 144.4V$

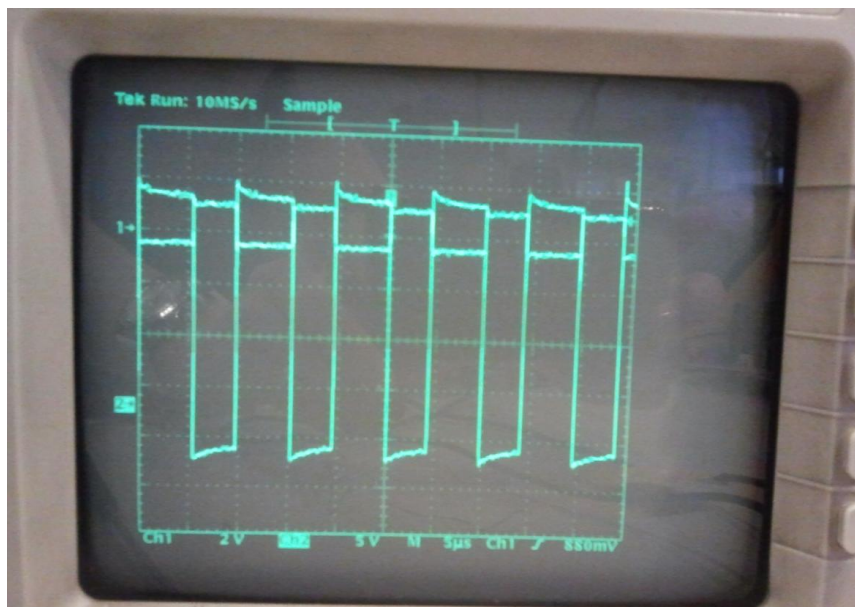


Figura 64 $V_{out} = 250$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Para carga de 200Ω

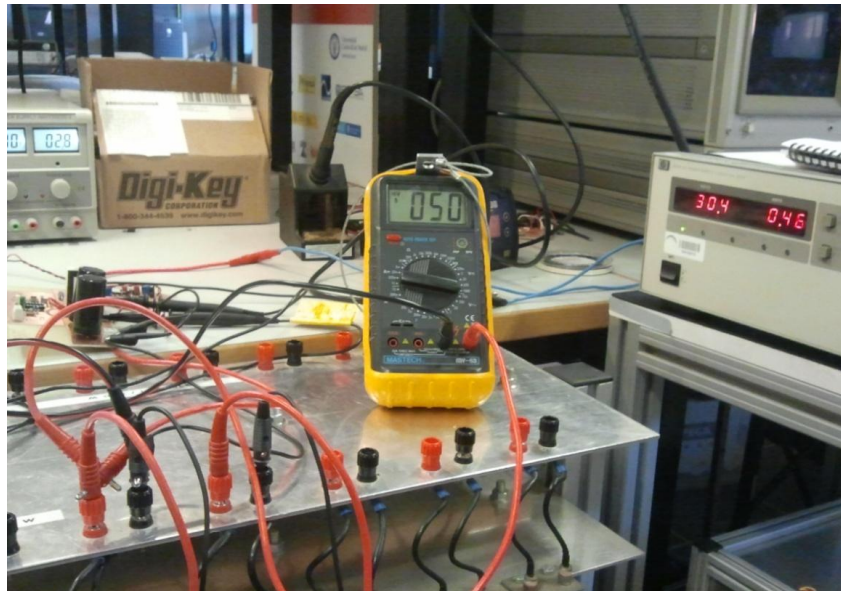


Figura 65 $V_{in} = 30.4$ $I_{in} = 0.46A$

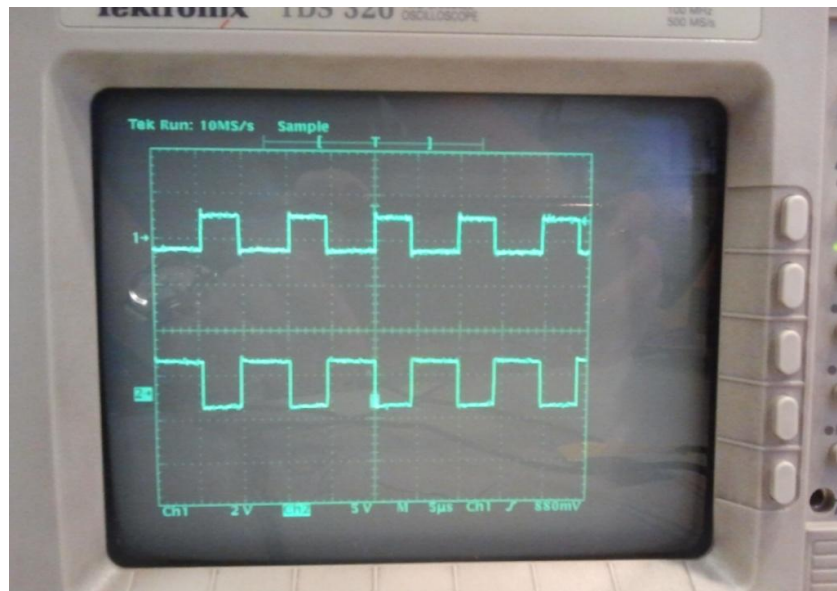


Figura 66 $V_{out} = 50V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

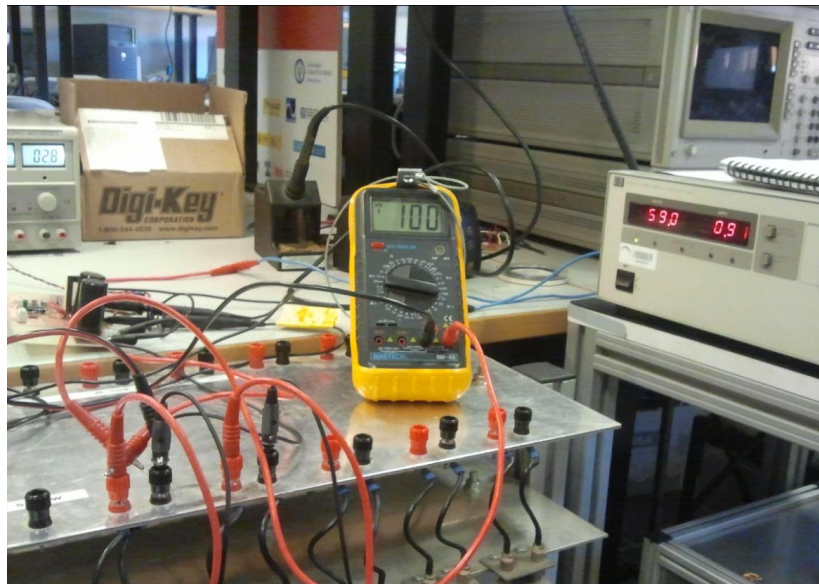


Figura 67 $V_{in} = 59.0V$ $I_{in} = 0.91A$

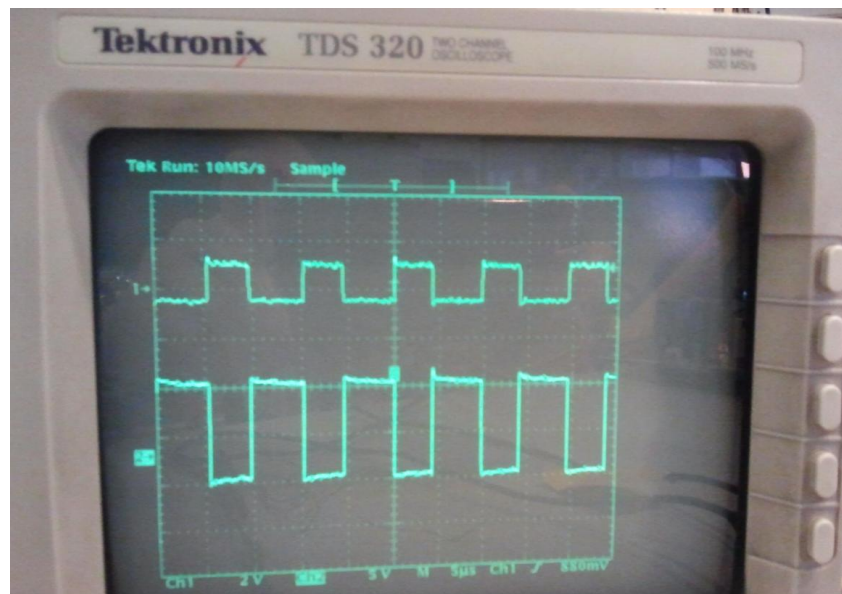


Figura 68 $V_{out} = 100V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Se repite la misma prueba cambiando la carga a 800Ω



Figura 69 $V_{in} = 57.2V$ $I_{in} = 0.23A$



Figura 70 $V_{out} = 100V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 71 $V_{in} = 113.5 \text{ V}$ $I_{in} = 0.46 \text{ A}$

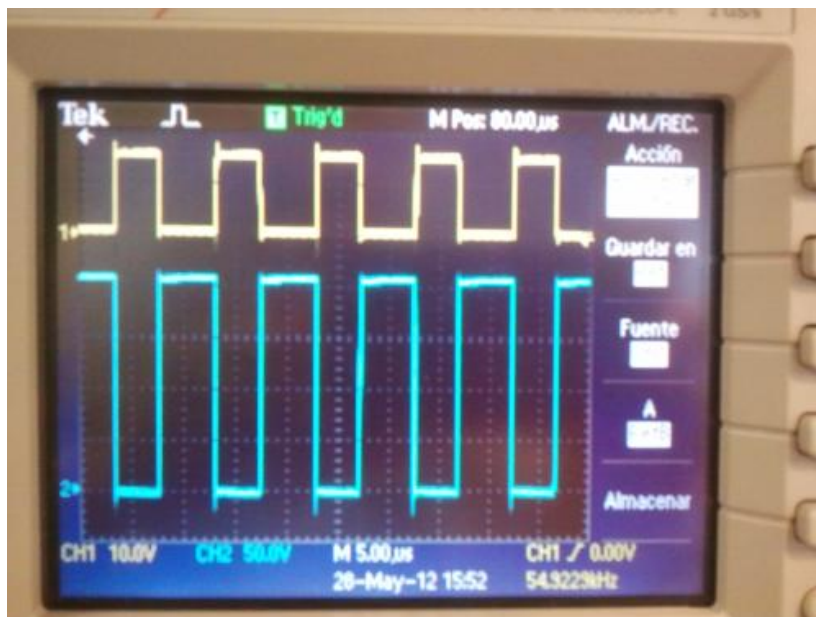


Figura 72 $V_{out} = 200 \text{ V}$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 73 $V_{in} = 169.7V$

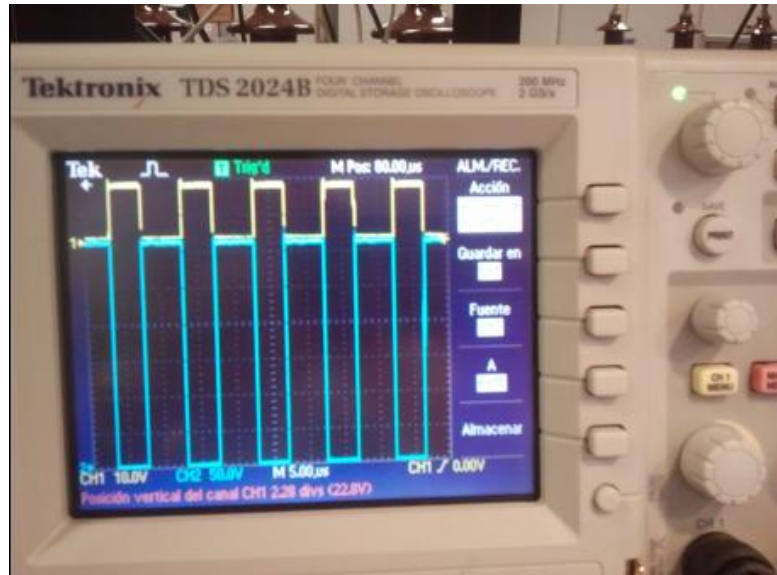


Figura 74 $V_{out} = 300V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR



Figura 75 $V_{in} = 200V$

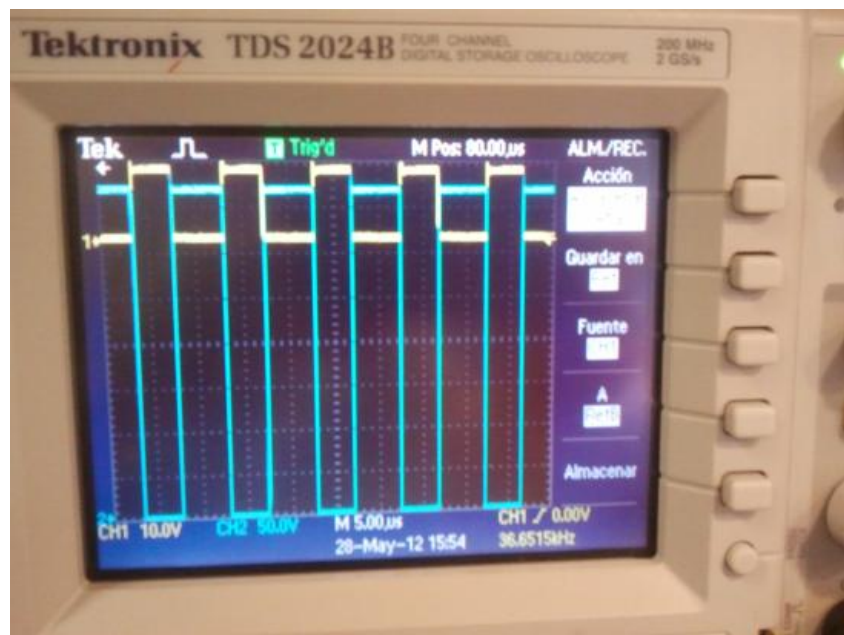


Figura 76 $V_{out} = 356V$



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

Se expone la tabla de los valores obtenidos poniendo diferentes valores en la resistencia de carga del convertidor elevador:

Corriente Continúa (Convertidor Elevador)						
Rc(Ω)	Vin	Iin	Vout	Pin	Pout	Pperdidas
800	57,3	0,25	100	14,325	12,5	1,825
800	85,5	0,38	150	32,49	28,125	4,365
800	99,7	0,44	175	43,868	38,28125	5,58675
800	113,9	0,46	200	52,394	50	2,394
800	128,2	0,52	225	66,664	63,28125	3,38275
800	142,3	0,58	250	82,534	78,125	4,409
800	156,2	0,64	275	99,968	94,53125	5,43675
800	170,4	0,7	300	119,28	112,5	6,78
800	198,8	0,82	350	163,016	153,125	9,891
800	217	0,89	383	193,13	183,36125	9,76875

Rc(Ω)	Vin	Iin	Vout	Pin	Pout	Pperdidas
400	57,4	0,46	100	26,404	25	1,404
400	87,2	0,69	150	60,168	56,25	3,918
400	115	0,92	200	105,8	100	5,8
400	144,3	1,15	250	165,945	156,25	9,695

Rc(Ω)	Vin	Iin	Vout	Pin	Pout	Pperdidas
200	30,5	0,46	50	14,03	12,5	1,53
200	59	0,91	100	53,69	50	3,69
200	74,7	1,16	130	86,652	84,5	2,152

Tabla 3 Valores de la validación experimental

En la Figura 77 se puede observar cómo evoluciona tanto la tensión de salida Vout con respecto a la de entrada Vin al variar la resistencia de carga Rc y en la Figura 78 se observa el rendimiento con respecto a la tensión de salida.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

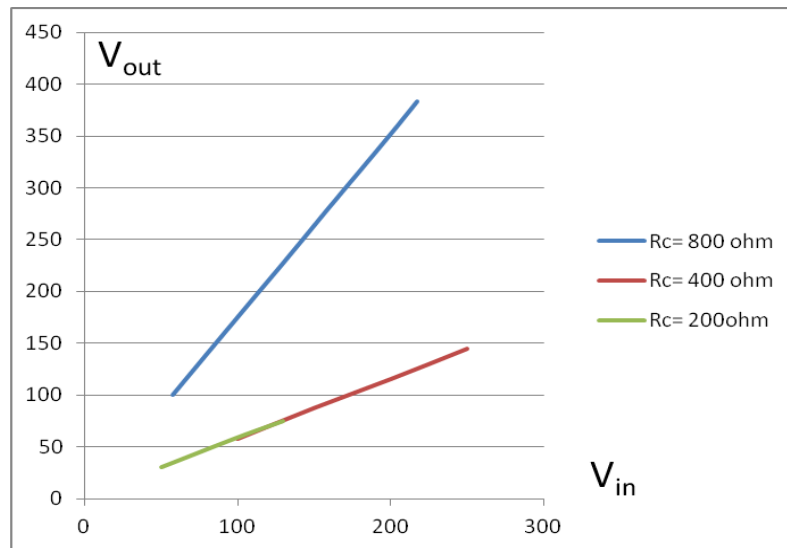


Figura 77 Variación de la tensión con respecto a la Resistencia de carga

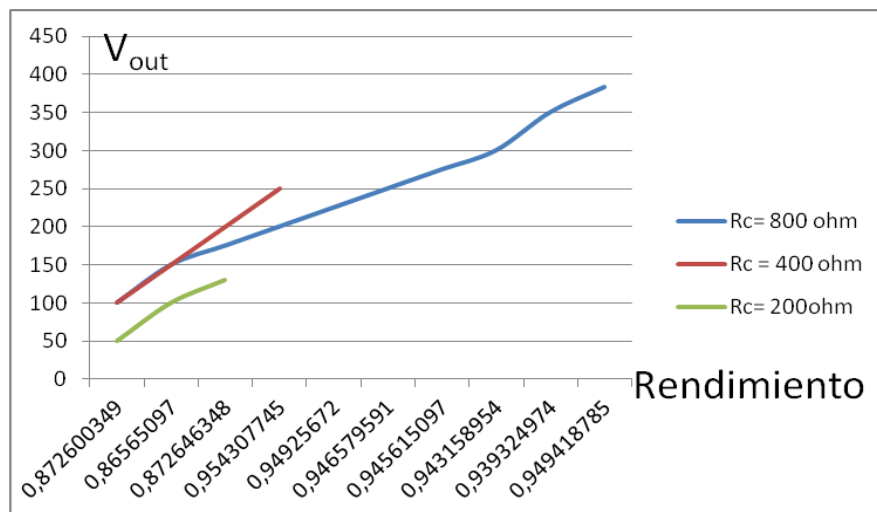


Figura 78 Rendimiento con respecto a la tensión de salida



7. Conclusiones

Para comprobar los resultados, se hace una última prueba y se comparan los resultados teóricos con los prácticos.

Las conclusiones que se muestran a continuación se obtuvieron gracias al trabajo desarrollado a lo largo del proyecto y apoyándose en los resultados prácticos obtenidos.

Se cumplieron los objetivos de partida y se llevó a cabo el diseño y simulación del convertidor corrector del factor de potencia.

Durante el proceso de diseño:

- Elección de los componentes semiconductores y de la bobina: se determinó cuales eran los mejores transistores, diodos y la mejor bobina mediante el análisis de diferentes dispositivos de distintos fabricantes.
- Diseño del lazo de control empleando la herramienta SmartCtrl.
- Validación en el dominio del tiempo del correcto funcionamiento del convertidor y su esquema de control empleando el simulador PSIM.
A nivel de equipo, las medidas teóricas, simuladas y ensayadas se asemejan mucho por lo que cumple razonablemente las especificaciones de diseño.
- Diseño y construcción del prototipo empleando OrCAD-Layout.
- Pruebas del prototipo en continua y medida del rendimiento.



8. Desarrollos futuros

Como trabajos futuros de este proyecto se pueden proponer:

- Pruebas finales del corrector del factor de potencia en lazo cerrado.
- Análisis de sensibilidad de la respuesta dinámica al variar diferentes parámetros de la etapa de control.
- Con la ayuda de la herramienta de SmartCTRL, cambiar el tipo de integrado se obtiene otro tipo de control que cambiaría por completo las simulaciones y los resultados experimentales.



9.1.Hoja de datos





CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

9.2. Especificaciones

Tensión de red: 75 – 275 V_{RMS}.

Frecuencia de conmutación típica 100 kHz, puede superar 200kHz.

Control del valor medio de la intensidad de red en cada periodo proporcional a la tensión de red.

Frecuencia de conmutación constante.

Feedforward con la tensión de alimentación.

Soft Start-up.

UC 3854 A tiene limitación de potencia.

9.3. Descripción de pines

Gnd (pin 1).

PKLMT (pin 2). Umbral 0,0V.

CA_{Out} (pin 3). Salida del regulador que se compara con el diente de sierra

I_{sense} (pin 4). Entrada (-) del amplificador de corriente. Conectada a GND a través de un a resistencia Rci. El valor medio de tensión en este pin es cero.

Mult Out (pin 5). Salida del multiplicador y entrada (+) del amplificador de corriente. El valor medio de tensión en este pin en régimen permanente es cero.

I_{VAC} (pin 6). Medida de la tensión de red. La corrección de factor de potencia hace que el valor medio en cada periodo de conmutación de corriente de red sea proporcional este valor. La tensión en Iac es 6V y la corriente máxima debe ajustarse a 0.6 mA.

V_{A Out} (pin 7). Salida del regulador de tensión de salida.

V_{RMS} (pin 8). Entrada de la muestra de la tensión de red para realizar la función feedforward.

V_{REF} (pin 9). Referencia de tensión 7,5V. Sirve para polarizar I_{VAC} (pin 6) y PKLMT (pin2).

ENA (pin 10). Habilita la salida del PWM, la tensión de referencia y el oscilador.



CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR

V_{SENSE} (pin 11). Entrada (-) del amplificador de tensión. Se conecta a una muestra de la tensión de salida. Su tensión en régimen permanente se ajusta a 7,5V.

R_{SET} (pin 12). Conectado a una resistencia que programa la corriente de carga del oscilador y la máxima corriente de salida del multiplicador.

SS (pin 13). Soft Start. Se conecta a un condensador que se carga con 14mA. La tensión en este pin será la tensión de referencia del regulador de tensión cuando su valor sea menor a 7,5V

C_T (pin 14). Se conecta una capacidad que junto con R_{SET} fijan la frecuencia del oscilador.

V_{CC} (pin 15). Tensión de alimentación mayor de 17 V y menor de 35 V. Demanda al menos 20mA.

GT Drv (pin 16). Salida PWM con driver para la puerta del MOSFET 200mA.

9.4. Notas de aplicación

El ancho banda del bucle de tensión se selecciona menor que la frecuencia de red.

El feedforward mantiene la ganancia del bucle de tensión constante por lo que el ancho de banda se puede aproximar mucho a la frecuencia de red.

El feedforward hace que el bucle de tensión realice un control de potencia.

En el control se introducen segundos armónicos con respecto a la frecuencia de red debido a:

- Rizado de la tensión de salida
- Rizado del feedforward

En el UC3854A

- la máxima corriente de salida del multiplicador es $2 I_{AC}$.
- I_{AC} variará I_{AC} entre 0 y 250 mA (en la nota de aplicación 600mA). La tensión en el pin 6 es 500mV. No se necesita R_{B1} entre pin 6 y V_{ref} (pin 9)



10. Bibliografía

- [1] Fabricación y Construcción de Equipos Electrónicos. INTRODUCCIÓN AL LAYOUT DE ORCAD – Clase – Práctica1(Diseño PCB) – UC3M, guía de clase, año 2010.
- [2] Fabricación y Construcción de Equipos Electrónicos. INTRODUCCIÓN AL LAYOUT DE ORCAD – Clase – Práctica2(Creación Footprint) – UC3M, guía de clase, año 2010.
- [3] L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti, “CONTROL TECHNIQUES FOR POWER FACTOR CORRECTION CONVERTERS”, fecha de consulta: 18/05/2012.
- [4] E.GIRÓN, “DISEÑO AUTOMÁTICO DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL CONVERTIDOR CA/CC ELEVADOR CON CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA”, fecha de consulta: 17/05/2012.
- [5] Leistungsfaktor.pdf
<http://www.mikrocontroller.net/attachment/25275/Leistungsfaktor.pdf>., fecha de consulta: 12/08/2012.
- [6] F.J Azcondo “UC 3854 High Power Factor Preregulator” , apuntes publicados en la página web del Capítulo del IEEE-IES-PELS, fecha de consulta: 5/02/2012.